

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Панченко Евгения Дмитриевна

**Динамика потока в приливных устьях малых рек
(на примере Беломорского бассейна)**

1.6.16 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук**

Москва – 2022

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

Научный руководитель – *Алабян Андрей Михайлович, кандидат географических наук, доцент*

Официальные оппоненты – *Кондратьев Сергей Алексеевич, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории математических методов моделирования Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН*

Летихин Анатолий Павлович, доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем гидрологии суши Горного института УрО РАН

Медведев Игорь Павлович, кандидат физико-математических наук, руководитель лаборатории цунами им. С.Л. Соловьева Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Защита диссертации состоится «3» ноября 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2(МГУ.11.02) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, ГЗ МГУ, географический факультет, 18 этаж, ауд. 18-01 (тел. +7(495)9392238, факс +7(495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/491821823/>

Автореферат разослан «27» сентября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Гидродинамический режим приливного устья реки определяется множеством факторов, действующих как со стороны реки, так и со стороны моря. При разных сочетаниях речных и морских гидрологических факторов формируется особый режим течений, определяющий транспорт наносов, морфологию русла и специфику динамического взаимодействия речных и морских вод, ввиду чего каждая устьевая область уникальна [Самойлов, 1962; Залогин, Родионов, 1969; Михайлов, 1998].

Наибольшее многообразие сочетаний величины прилива и параметров речного стока в устьях рек России свойственно бассейну Белого моря. В Двинском заливе высота прилива редко превышает один метр, а в эстуарии Мезени и Кулоя она может достигать 9 м [Демиденко и др., 2015].

В то время как гидрологический режим устьев крупных рек – Северной Двины, Онеги и Мезени – исследован достаточно детально [Гидрология...1965; Лупачев, 1982; Демиденко и др., 2008; Землянов, 2011; Шевченко, 2013; Лебедева, 2016], устьевым областям многочисленных малых и средних рек уделялось значительно меньше внимания. Однако в последние годы в связи с возрастающим интересом к вопросам ресурсного, транспортного и рекреационного потенциала Российской Арктики устья северных рек меньшего размера также становятся объектами интенсивных гидрологических исследований [Долотов и др., 2005; Алабян и др., 2018; Мискевич и др., 2018; Толстикова и др., 2021].

Наиболее эффективным методом исследования гидродинамического режима приливных устьев в настоящее время представляется сочетание полевых работ и гидродинамического моделирования [Лебедева и др., 2015; Ионов и др., 2018]. Данные полевых измерений необходимы для настройки, калибровки и верификации моделей. Детальная модель конкретного устья реки предоставляет целостную в пространстве и времени картину изменения полей течений, уровней воды и других гидродинамических характеристик, позволяет исследовать гидродинамический режим устьевой области при различных сочетаниях факторов, влияющих на структуру потока.

Такой комплексный подход успешно реализуется в настоящее время для приливных дельт Северной Двины [Лебедева, Одоев, 2021] и Печоры [Крыленко и др., 2021]. Аналогичные работы выполняются и зарубежными исследователями [Abreu et al, 2020; Matte et al, 2017]. Модели правдоподобно воспроизводят общие черты гидродинамического режима, однако в некоторых случаях количественные несоответствия результатов моделирования фактическим значениям оказываются весьма существенными. Принято считать, что погрешности результатов моделирования в основном определяются неточностями задания рельефа русла и поймы и граничных условий, что, в свою очередь, связано со сложностью проведения в крупном устье реки всего комплекса измерений, необходимого для настройки модели.

Возможности современного оборудования не всегда достаточны для измерений требуемой точности и детальности в устье крупной реки. Например, одно измерение расхода воды даже с использованием акустического доплеровского профилографа (ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler) в устьевом створе Мезени шириной 9 км занимает более 1,5 часов [Демиденко и др., 2015]. За это время уровень воды изменяется более чем на два метра, то есть полученное значение расхода воды оказывается серьезно заниженным по сравнению с реальным мгновенным его значением. В устье малой реки ADCP позволяет измерить расход воды за 3 – 5 минут, что вполне может рассматриваться как мгновенное значение при анализе полусуточного приливного цикла.

Соответственно, ввиду своей компактности и относительно простой морфологии устье малой реки дает возможность в ходе полевых работ получить материал высокой точности и на его основе оценить реальные возможности гидродинамических моделей и проанализировать причины возникновения погрешностей моделирования.

Результаты исследования гидродинамического режима приливного устья малой реки также можно использовать для выявления общих закономерностей гидродинамики, которые на современном этапе развития оборудования

невозможно получить с помощью непосредственных измерений в устье более крупной реки.

Таким образом, исследуемая тема актуальна как из-за возрастающего практического интереса к устьям малых рек Российской Арктики, так и с точки зрения изучения механизмов и факторов гидродинамики приливных участков рек.

Цель диссертации – исследование пространственно-временной изменчивости основных гидродинамических параметров неустановившихся и реверсивных водных потоков.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

- выполнить полевые исследования гидродинамического режима разнообразных приливных устьев малых рек бассейна Белого моря в различные фазы водного режима;
- выявить факторы трансформации приливной волны при ее движении вверх по руслу реки;
- исследовать применимость одномерной гидродинамической модели к устьевому участку малой реки при реверсивном движении водных масс;
- определить диапазон изменения членов уравнения движения, коэффициентов гидравлического сопротивления и коррективов скорости в течение приливного цикла в устьях рек с различной величиной прилива;
- выявить общие черты и различия гидродинамического режима приливных устьев больших и малых рек.

Предмет исследования – динамическое взаимодействие реки и моря в приливных устьях малых рек.

Объектами исследования являются устья рек бассейна Белого моря. Наиболее детально рассмотрены четыре малые реки: Кянда, Тамица, Сёмжа и Лая. Помимо малых рек в некоторых разделах диссертации присутствует анализ гидродинамического режима устьевых участков Онеги, Мезени и Северной Двины, необходимый для сопоставления особенностей гидродинамики в устьях рек разных размеров.

Методы исследования. Для исследования гидродинамики приливных устьев использовался комплексный подход, основанный на сочетании экспедиционных измерений и гидродинамического моделирования. С одной стороны, результаты измерений непосредственно использовались для выявления особенностей распространения приливной волны вверх по руслу реки и характера ее трансформации, включая последовательность наступления экстремумов уровней и расходов воды в ходе приливного цикла. С другой стороны, полевые данные были использованы для разработки, калибровки и верификации одномерных гидродинамических моделей и последующей оценки области их применимости.

Полевые работы заключались в синхронных измерениях уровней и расходов воды в двух створах, расположенных на разном удалении от моря, в течение полного приливного цикла. Расходы воды измерялись с помощью ADCP River-Ray, а уровни воды – барометрическими самописцами Keller и Solinst [Panchenko, Alabyan, 2022]. На основе полученных данных проводились расчеты количественных значений членов уравнения движения, коррективов скорости и коэффициентов гидравлического сопротивления.

Для гидродинамического моделирования использовался главным образом программный комплекс HEC-RAS, находящийся в открытом доступе.

Научная новизна. Расчеты членов уравнения движения и параметров, в него входящих, были выполнены впервые для полного полусуточного приливного цикла, включая периоды смены направления течений. Это позволило расширить представления о механизмах гидродинамики приливных устьев рек. Были получены уникальные сведения о фактических значениях коэффициентов шероховатости и коррективов скорости в периоды сильной нестационарности потока. Коррективы скорости были впервые рассчитаны по данным измерений акустик-доплеровскими профилографами течений. Существенные вариации этих параметров в течение приливного цикла должны учитываться при записи инерционных членов уравнения движения, для чего была предложена новая форма записи уравнения движения для приливных устьевых участков рек с реверсивным движением водных масс.

Переход от измерений скоростей течения на «характерных» вертикалях к непосредственному измерению расходов воды позволил более корректно охарактеризовать последовательность наступления гидравлических экстремумов в ходе приливного цикла.

Защищаемые положения.

1. Скорость распространения приливной волны определяется темпами продвижения ее фронта, а время остановки течения и порядок экстремумов уровня и расхода воды – характером ее трансформации на устьевом участке. При этом определяющими факторами трансформации являются рельеф русла и наличие ледяного покрова, и в меньшей степени – величина речного стока.
2. Одномерные гидродинамические модели, основанные на уравнениях Сен-Венана, наилучшим образом воспроизводят скорость продвижения приливной волны, время и порядок наступления экстремумов уровней и расходов воды, и в меньшей степени – амплитуду приливных колебаний уровня и диапазон изменения приливных и отливных расходов воды.
3. Коррективы скорости (коэффициенты Кориолиса и Буссинеска) существенно изменяются в течение приливного цикла, ввиду чего необходима модификация уравнения движения системы Сен-Венана применительно к приливному устьевым участкам рек.
4. Гидравлическое сопротивление в течение приливного цикла может изменяться на несколько порядков: перед разворотом течения происходит его резкое увеличение, а после – резкое уменьшение. Во временные отрезки квазиустановившегося течения на приливе и отливе коэффициенты гидравлического сопротивления имеют близкие значения.

Практическая значимость исследования определяется возрастающим интересом к арктическому региону России, где города и поселки большей частью располагаются в устьях рек. Знание режима реверсивного движения водных масс, существенно изменяющих скорость и направление течения даже в микроприливных устьях, является ключевым элементом при проектировании,

строительстве и эксплуатации портов, планировании водохозяйственных мероприятий, рекреационном и рыбохозяйственном использовании устьевых акваторий.

Результаты работы использованы при выполнении проектов РФФИ № 16-05-01018 «Исследование динамики приливных волн и сгонно-нагонных явлений в устьях рек бассейна Белого моря», № 19-35-90032 «Особенности динамики реверсивных водных потоков в приливных устьях малых рек бассейна Белого моря», № 18-35-00531 «Проникновение осолоненных вод в морские устья рек во время приливов и ветровых нагонов: анализ факторов и моделирование», №18-05-60021 «Сток рек и изменение водного и ледотермического режима устьевых областей и морских побережий Российской Арктики в XXI веке» и РФФИ № 22-29-01184 «Исследование отрицательной турбулентной вязкости в приливных устьях рек».

Апробация результатов. Основные результаты, составившие содержание данной работы, докладывались на научных конференциях «ECSA 58 & EMECS 13: Estuaries and coastal seas in the Anthropocene» (2021), «European Geosciences Union General Assembly (2021)», «Морские исследования и образование: MARESEDU» (2018, 2019, 2020, 2021), «Моря России» (2020, 2021), «Четвертые Виноградовские Чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению» (2020), «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» имени Л.Н. Карлина (2019), «Геология морей и океанов» (2019), «XII семинар молодых ученых вузов, объединяемых Межвузовским научно-координационным советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов» (2022).

Личный вклад автора. Автор диссертации участвовала в экспедициях кафедры гидрологии суши МГУ (в том числе в качестве организатора полевых работ) в устьевые области рек бассейна Белого моря в 2015 – 2021 гг. (август 2015 г., август 2018 г. – Сёмжа и Мезень; август 2016 г., август 2017 г., май 2018 г., февраль 2017 г., февраль 2019 г., февраль 2021 г. – Кянда и Тамиза; август 2017 г., февраль 2017 г., февраль 2019 г. – Онега; май 2019 г., июль 2019 г., сентябрь 2019 г., июль 2020 г. – Лая; июль 2016 г., июль 2017 г., июль 2018 г., май 2019 г., июль

2020 г. – Северная Двина; февраль 2020 г. – Варзуга, Умба, Кузрека). Автор провела расчеты членов уравнения движения, коэффициентов шероховатости, коррективов скорости, а также оценила возможные ошибки расчетов, связанные с инструментальной погрешностью измерений. Автором диссертации были разработаны модели устьевых участков Сёмжи, Кянды, Лаи и Онеги с использованием программного комплекса HEC-RAS.

Благодарности. Автор благодарна организаторам и участникам экспедиций в устьевые области рек бассейна Белого моря Н.А. Демиденко, Н.Л. Фроловой, А.А. Попрядухину, П.Н. Терскому, И.Н. Крыленко, С.В. Лебедевой, С.В. Платонову, Е.С. Повалишниковой, М. Льюменсу, А.А. Алексеевой, Л.С. Одоеву, А.М. Медину, Е.А. Фингерт, Л. Льюмменсу, А.Д. Аракельянцу, а также студентам и аспирантам, участвовавшим в зимних экспедициях НСО, за большое количество отобранного материала, помощь в обработке и анализе данных, интерес и вдохновение. Автор также выражает признательность Ю.С. Даценко и С.Л. Горину за ценные замечания и рекомендации при завершении работы над диссертацией.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 117 источников и 4 приложений. Работа изложена на 157 страницах текста, включает 79 рисунков и 23 таблицы. Список литературы включает 72 публикации на русском языке и 45 публикаций на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Глава 1. Изученность динамики вод в приливных устьях рек

Первая глава содержит литературный обзор исследований наиболее важных аспектов динамики водных потоков в приливных устьях рек: оценке действующих сил в водном потоке и механизму распространения приливной волны вверх по

руслу реки. В главе рассмотрена система уравнений Сен-Венана, лежащая в основе описания неустановившегося движения воды.

Теоретические исследования трансформации приливной волны на устьевом участке реки базируются на численных и аналитических методах решения дифференциальных уравнений гидродинамики в одномерном (1D) виде. Гидродинамическое моделирование в настоящее время остается наиболее комплексным инструментом исследования особенностей движения приливных волн. Тем не менее, аналитические методы, в основе многих из которых лежит учет морфометрических особенностей эстуариев, в ряде задач также оказываются эффективными.

Расчеты вклада членов уравнения движения изначально выполнялись для оценки возможности пренебрежения частью из них для экономии машинного времени. Однако в приливных устьях рек была установлена существенная роль инерционных членов уравнения движения, а в ряде случаев – и плотностного члена [Михайлов, 1998; Полонский, Горелиц, 1990; Полонский, Мишин, 2013; Knight, 1981], притом, что периоды смены направления течений не были охвачены измерениями и остались неизученными.

Глава 2. Белое море и устья рек, в него впадающих

Во второй главе кратко описан режим приливных колебаний уровня в Белом море, приведен обзор современных полевых исследований в устьях рек его бассейна, перечислены объекты исследования и экспедиции, в которых были получены данные для диссертации, описана используемая методика измерений и оборудование для полевых работ. Основные объекты диссертационного исследования – четыре малые реки и их устьевые области – описаны более подробно, а в заключительном разделе главы приведена сравнительная характеристика динамики потока в устьях этих рек на основе результатов полевых измерений.

Белое море отличается большим разнообразием величины прилива на своей акватории (от 0,5 м до 9 м). В Белое море впадает 57 рек [Ресурсы поверхностных вод..., 1972], большинство из которых являются малыми, и, хотя по берегам многих

рек расположены поселения, большинство устьев до сих пор остаются совсем не изученными в гидрологическом отношении. За последние двадцать лет только в семнадцати устьевых областях проводились экспедиционные исследования научными группами из МГУ, ИО РАН, ГОИН, ИВП Севера КарНЦ РАН, СПбГУ (рисунок 1, а). В одиннадцати из них полевые работы выполнялись экспедициями кафедры гидрологии суши МГУ с участием автора диссертации. Задачи полевых работ были связаны с исследованием гидродинамического режима устьевых участков рек в условиях приливов и включали в себя измерения уровней, расходов воды, солёности, температуры и мутности речной и морской воды.

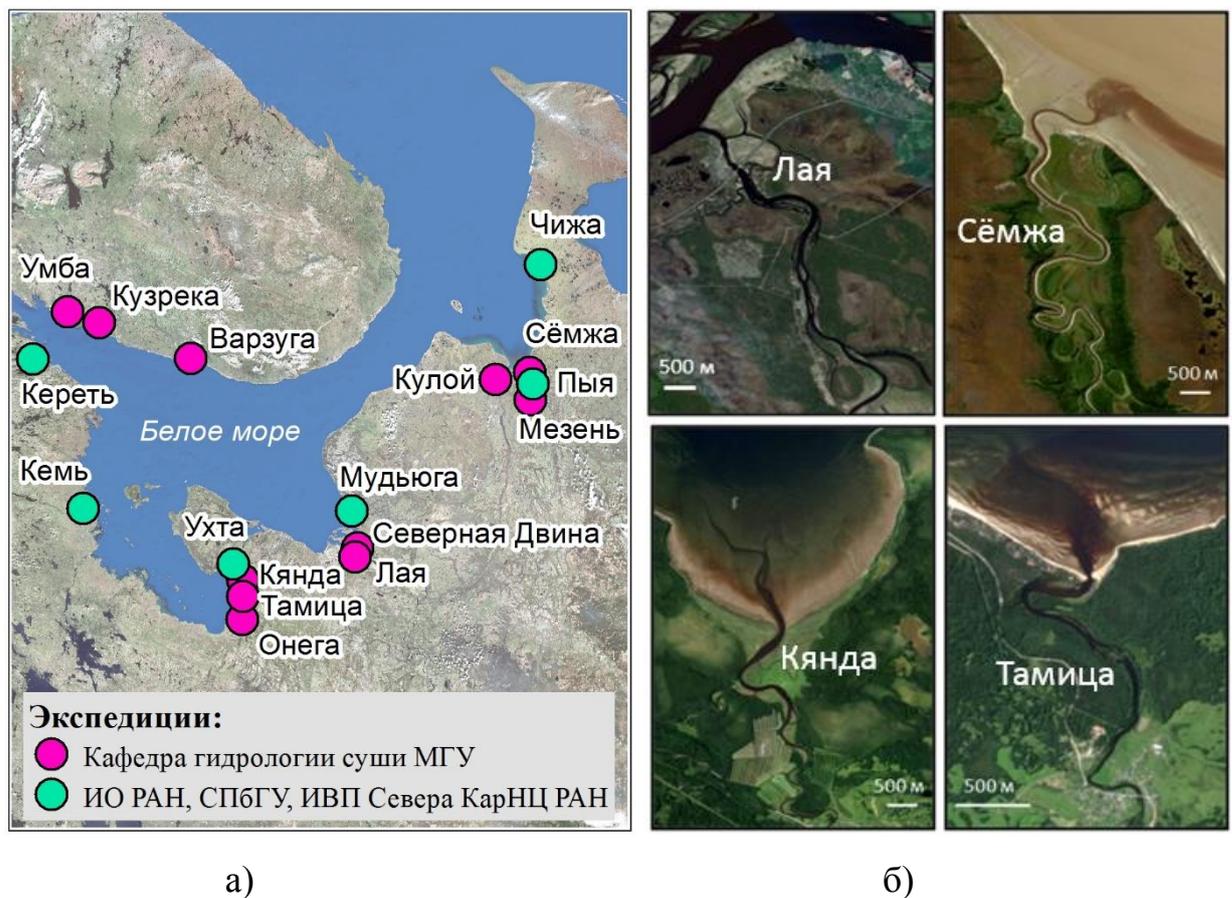


Рисунок 1 – Объекты исследования: а) схема расположения устьев рек Беломорского бассейна, охваченных современными экспедиционными исследованиями; б) спутниковые снимки устьевых областей малых рек – основных объектов исследования (источники – Yandex-карты и GoogleMaps).

Основными объектами исследования в диссертации являются устьевые участки четырех малых рек бассейна Белого моря. Река Сёмжа впадает в эстуарий Мезени, реки Кянда и Тамица – в юго-восточную часть Онежского залива, река Лая

– в Никольский рукав дельты Северной Двины (рисунок 1, б). Величина сизигийного прилива в устье Сёмжи достигает 8 – 9 м, в устье Кянды составляет 2 – 2,5 м, в устье Тамицы – 1,5 м, в устье Лаи – 0,5 – 1 м. Таким образом, рассматриваются макро-, мезо- и микроприливные устья.

Реки протекают в схожих физико-географических условиях, определяющих особенности водного режима, однако существенно различаются по гидродинамическому режиму в нижнем течении. Это объясняется как различием в географическом положении и величине прилива, так и разным геоморфологическим строением русел рек на устьевых участках.

Глава 3. Распространение приливных волн по устьевым участкам рек

На основе собранных в экспедициях данных об уровнях воды в устьях больших и малых рек бассейна Белого моря были исследованы особенности распространения приливной волны по руслам рек. В третьей главе описано влияние различных факторов на характер трансформации приливной волны, приведен анализ последовательности наступления экстремальных значений уровней и расходов воды в зависимости от интенсивности прилива и величины речного стока, а также рассчитаны скорости распространения приливной волны вверх по руслам рек.

Полусуточные приливы на акватории Белого моря имеют правильную синусоидальную форму с примерно равным временем роста и падения уровня воды. Однако при движении приливной волны по мелководному устьевому взморью и далее по руслу устьевого участка реки происходит изменение ее высоты и искажение формы. В таблицах приливов для пунктов, расположенных в устьях рек, часто возникают значительные ошибки в рассчитанном времени наступления малой и полной воды, что негативно сказывается на организации судоходства, рыболовства и прочей хозяйственной деятельности.

Определяющим фактором уменьшения высоты волны в русле является уклон дна реки, а степень трансформации формы приливной волны в основном определяется расстоянием, на которое она распространяется. Ледяной покров существенно влияет и на величину прилива (уменьшая ее примерно вдвое), и на

искажение формы волны за счет уменьшения времени роста уровня. Увеличение стока в половодье и паводки также приводит к трансформации прилива, однако для заметного уменьшения высоты приливной волны расходы воды в реке должны измениться в десятки раз. Нагон приводит к уменьшению асимметрии прилива, увеличивая время роста уровня воды.

Скорость движения волн (как прямых, так и обратных) должна определяться по скорости смещения их характерных точек, например, фронта или гребня (фазовая скорость). Для прямых волн половодья и паводка расчет обычно выполняется по гребню. Однако для приливных устьев рек, где доминируют обратные волны, и приливная волна сильно трансформируется, скорости движения фронта и гребня волны значительно различаются. На некоторых устьевых участках (например, на Кянде и Тамиде) полная вода наступает одновременно на всем их протяжении, и рассчитать скорость движения гребня волны невозможно в принципе. На Лае, Сёмже, а также на Онеге и Мезени, где максимальный уровень воды фиксируется последовательно в створах, расположенных на различном расстоянии от устья, скорость движения гребня волны в среднем в два раза превышает скорость движения ее фронта. При этом для устьев больших рек характерно уменьшение скорости распространения волны при удалении от устьевого створа, в то время как на малых реках скорость движения определяется скорее местными факторами (чередованием плесов и перекатов, наличием порогов). Наличие ледяного покрова практически не влияет на скорость движения прилива. Таким образом, при расчете распространения приливной волны по устьевому участку реки необходимо ориентироваться на скорость продвижения фронта волны, а не ее гребня.

Сравнение рассчитанных по формуле Лагранжа и определенных по результатам полевых измерений значений скорости движения приливных волн в устьях рек Белого моря показало, что формула Лагранжа завышает скорости в несколько раз, поэтому ее нельзя использовать даже для приблизительных оценок.

Также для устьев рек Беломорского бассейна были установлены диапазоны продолжительности периодов между моментами наступления малой и полной воды

(публикуемыми в таблицах приливов) и моментами разворота течений и наступления максимумов приливных и отливных расходов воды.

Для малых рек в межень временные отрезки между экстремумами уровней и разворотом течений как в начале прилива после малой воды, так и в начале отлива после полной воды не превышают 30 минут, в то время как для крупных рек столь короткий интервал характерен лишь для мезо- и макроприливных эстуариев. В условиях повышенного речного стока время между началом прилива и разворотом течений увеличивается, а время между полной водой и обратным разворотом течений на отливе, наоборот, сокращается, вплоть до изменения порядка наступления экстремумов. Период времени между максимальным приливным (отрицательным) расходом воды и максимумом уровня воды составляет менее часа для мезо- и макроприливных устьев рек. Продолжительность периода между наступлением полной воды и максимальным отливным (положительным) расходом воды имеет максимальный разброс и может меняться от 45 минут до 5 часов обычно из-за слабой выраженности максимума отливного расхода воды.

При движении по мелководному взморью и далее вверх по руслу реки изначально синусоидальная приливная волна меняет форму, превращаясь из синусоиды в «импульсоиду» – резкие «всплески» изменения уровня воды сменяются продолжительными периодами квазиустановившегося течения. Для характеристики этого явления был введен параметр, характеризующий период постоянства уровней воды в фазу отлива. Продолжительность этого «бесприливного» периода зависит от строения русла, удаленности от устьевого створа, величины речного стока и наличия ледяного покрова. Знание этих закономерностей для каждой реки позволяет снизить трудозатраты и упростить организацию гидрологических полевых работ, сокращая продолжительность измерений с полного приливного цикла до его «активной» фазы.

Глава 4. Гидродинамическое моделирование устьевых участков рек

Наряду с непосредственными полевыми наблюдениями и измерениями, для исследования гидродинамического режима приливных устьев применялось гидродинамическое моделирование. В случаях, когда основной целью

исследования является анализ изменений гидродинамических характеристик потока по длине реки (длина исследуемого участка превышает ширину реки на два порядка и более) предпочтительно использование одномерных (1D) моделей. Для создания, калибровки и верификации одномерных моделей требуется гораздо меньше фактической информации, а для проведения расчетов – меньше вычислительной мощности и времени по сравнению с двумерными (2D) и трехмерными (3D) моделями.

Для оценки возможностей и границ применимости одномерных гидродинамических моделей при реверсивном движении водных масс на устьевом участке реки были разработаны модели микро-, мезо- и макроприливных устьев малых рек Лаи, Кянды и Сёмжи, а также мезоприливной эстуария Онеги. При этом для эстуария Онеги были разработаны двумерная и трехмерная модели для сравнения результатов по моделям различной мерности. Результаты расчетов и их анализ представлены в четвертой главе.

Для создания 1D моделей использовался некоммерческий программный комплекс HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System, США), основанный на системе уравнений Сен-Венана, которая решается методом конечных разностей.

Для моделей всех рек (кроме Лаи) нижняя граница была расположена в устьевом створе, а верхняя – выше влияния приливов на гидродинамический режим реки. На Лае нижняя граница находится в 1,8 км выше устьевого створа, так как на участке ниже расположен закрытый Лайский док, где невозможно проведение измерений. Длина модели Онеги составила 31,0 км, Лаи – 26,3 км, Кянды – 9,9 км, Сёмжи – 21,3 км. Рельеф русла задавался поперечными профилями, расположенными через 100 – 500 м. В качестве верхнего граничного условия задавался постоянный (стоковый) расход воды, на нижней границе – нестационарные уровни воды в устьевом створе.

Модель Онеги калибровалась по данным измерений в период летнего паводка, и подобранные в ходе калибровки коэффициенты шероховатости для одномерной модели составили 0,020 – 0,038. Одномерная модель Онеги воспроизводит и

уровни, и расходы воды с высокой точностью на всем протяжении устьевом участке. Результаты моделирования уровней и расходов воды в 1D модели практически совпадают с результатами двумерного моделирования, выполненного в программном комплексе DELFT3D [Panchenko et.al, 2019]. Ошибки в моделировании величины прилива не превышают 1 – 4 % (1 – 5 см), расчетная скорость распространения прилива совпадает с фактической, диапазон колебания расходов воды в течение приливного цикла на Онеге в калибровочных створах занижен менее чем на 4 % (рисунок 2), что сопоставимо с точностью гидрометрических наблюдений.

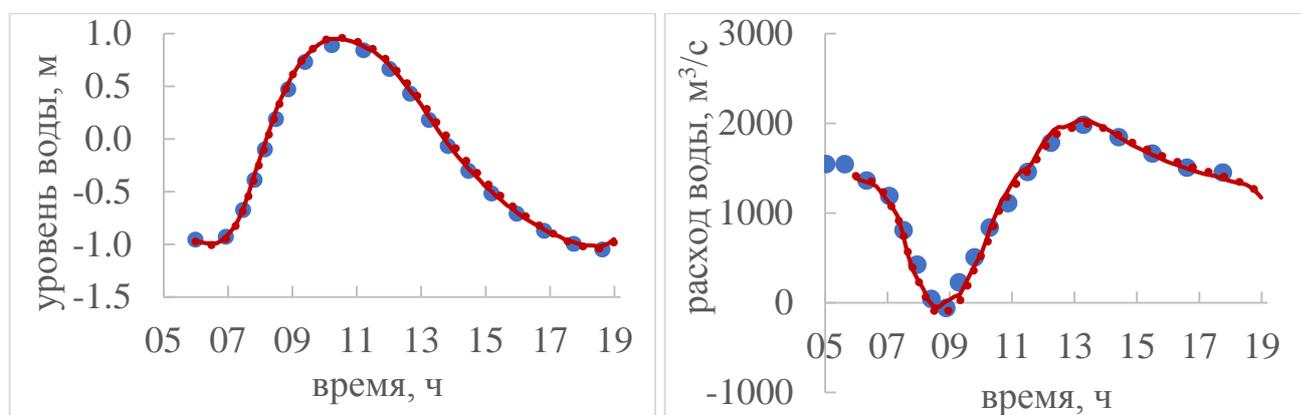
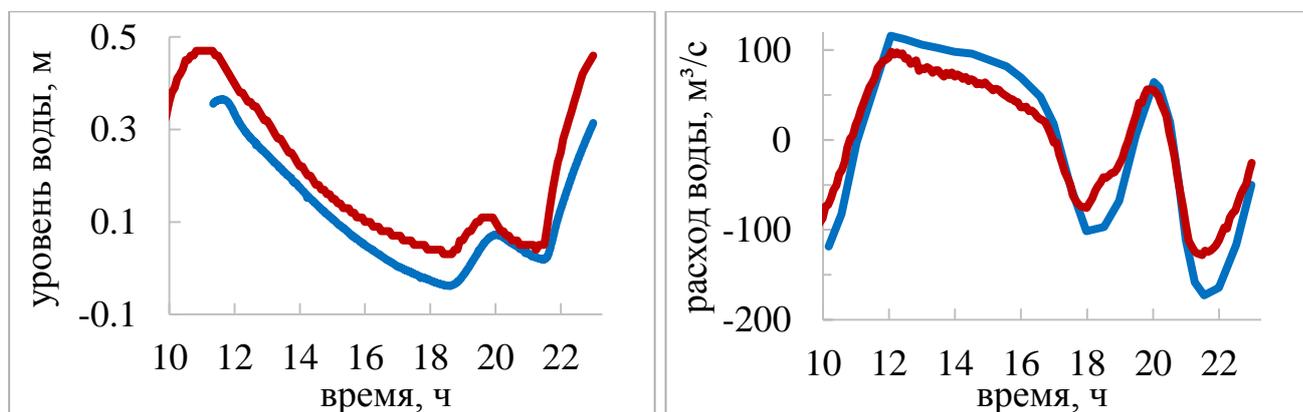


Рисунок 2 – Уровни и расходы воды на устьевом участке Онеги в 6 км от устьевого створа (синими точками обозначены фактические данные на 09.08.2017 г., красной линией – расчетные по 1D модели, красными точками – расчетные по 2D модели).

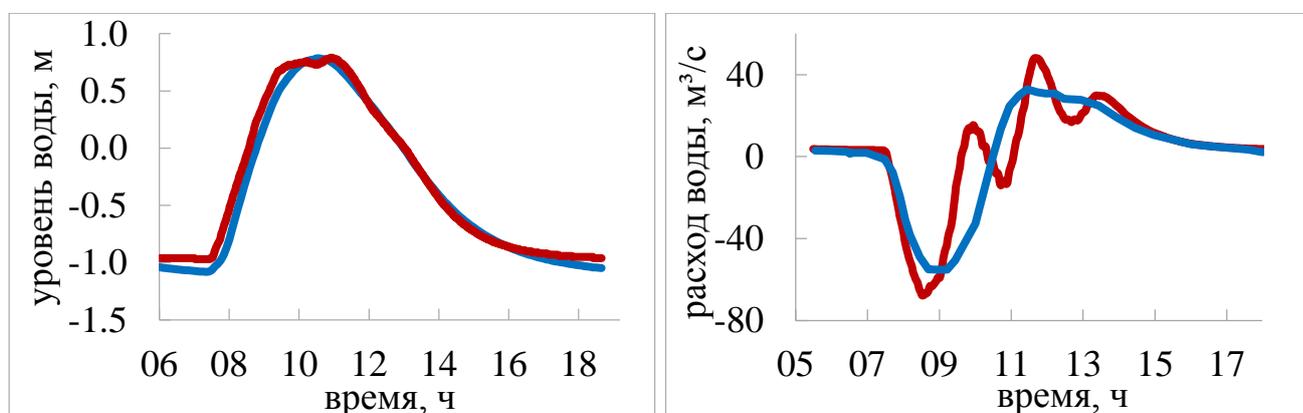
Модели малых рек калибровались по данным измерений, выполненных в летнюю межень. Подобранные значения коэффициента шероховатости оказались значительно меньше «типичных» для естественных русел со сходными морфометрическими характеристиками. Для нижнего участка Сёмжи коэффициент шероховатости составил 0,015, для Кянды и Лаи – 0,01.

Модели Сёмжи, Кянды и Лаи с разной степенью точности воспроизводят особенности их гидродинамического режима, как правило, занижая высоту прилива: на Кянде на 5 % (10 см), на Лае – на 5 – 7 % (3 – 5 см), на Сёмже – на 6 – 14 % (40 – 50 см). Диапазон изменения расходов воды в течение приливного цикла на Лае оказался меньше фактического на 22 %, на Сёмже он занижен на 13 – 18 %, на Кянде – на 10 %.

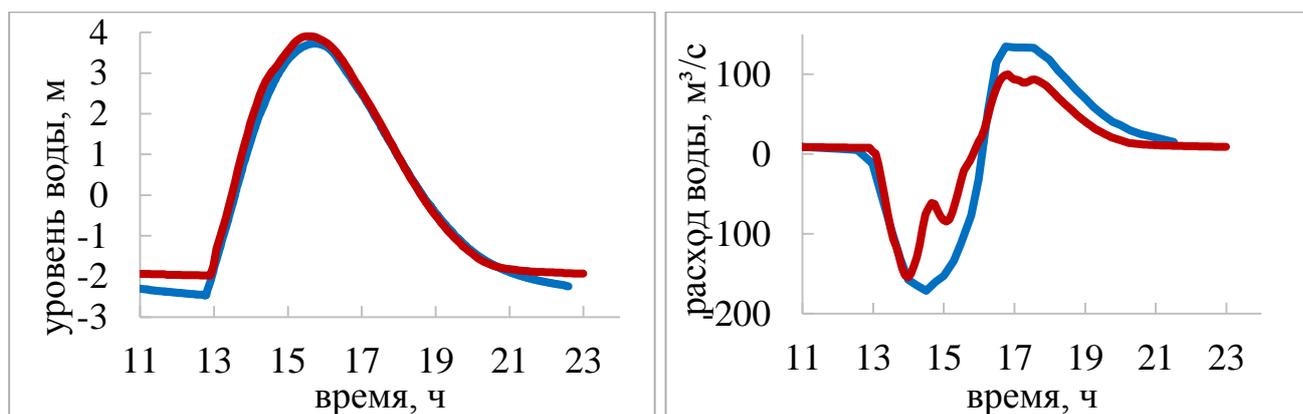
на Кянде – завышен на 4 – 35 % (рисунок 3). Результаты моделирования ухудшаются при удалении от устьевого створа.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Уровни и расходы воды на устьевых участках малых рек: а) Лая в 6 км; б) Кянда в 2,8 км; в) Сёмжа в 3,6 км от устьевого створа (синим цветом обозначены фактические данные на 25.07.2020 г. для Лаи, на 04.08.2016 г. для Кянды, на 14.08.2018 г. для Сёмжи, красным – расчетные).

Все модели точно воспроизводят скорость движения фронта приливной волны и, соответственно, дальность распространения приливных колебаний уровня воды и реверсивных течений, а также время наступления минимальных и максимальных уровней, экстремумов расходов воды и разворота течений.

Наиболее существенным недостатком моделей малых рек являются некоторые нефизичные колебания уровней и расходов воды на Кянде и Сёмже, фактически не наблюдающиеся и связанные с численной неустойчивостью решения при подобранных маленьких коэффициентах шероховатости. Однако если их не принимать во внимание, осредненные значения оказываются вполне адекватными.

Исследование возможных причин возникновения погрешности моделирования показало, что они могут быть связаны с особенностями записи уравнения движения в системе Сен-Венана при ее применении для расчета реверсивных водных потоков.

Глава 5. Особенности динамики потока в приливных устьях

Основой математического аппарата для описания движения потока в приливном устье является уравнение движения Сен-Венана, обычно записываемое в виде:

$$-\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\alpha u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\tau}{\rho g R} + \frac{h}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad (1)$$

где x – продольная координата вдоль динамической оси потока, направленная вниз по течению; t – время; z – отметка свободной поверхности; u – средняя скорость; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность воды; τ – касательное напряжение; R – гидравлический радиус, который может быть принят равным средней глубине русла h для русловых потоков, когда их ширина превосходит глубину на порядок и более; α_0 – коэффициент Буссинеска (корректив кинетической энергии;) α – коэффициент Кориолиса (корректив количества движения).

Левая часть уравнения движения представляет собой уклон водной поверхности $I = -\frac{\partial z}{\partial x}$, который также называют «геометрическим уклоном». Член уравнения движения $\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t}$ принято называть локальным ускорением, $\frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x}$ –

конвективным ускорением, а их вместе – «инерционными членами». Третий член правой части уравнения (1) представляет собой уклон трения $I_{mp} = \frac{\tau}{\rho g R}$, называемый также «гидравлическим уклоном» или «фрикционным членом». Он обычно выражается исходя из формул инженерной гидравлики (Шези, Шези-Маннинга, Дарси-Вейсбаха и т.п.):

$$I_{mp} = \frac{u^2}{C^2 R} = \frac{n^2 u^2}{R^{\frac{4}{3}}} = \frac{\lambda u^2}{8gR}, \quad (2)$$

где C – коэффициент Шези; n – коэффициент шероховатости Маннинга; λ – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления Дарси-Вейсбаха.

Для приливного устья с реверсивными течениями в уклоне трения квадрат средней скорости заменяется на произведение скорости на ее модуль, чтобы обеспечить действие силы трения в направлении, обратном течению воды.

В «классическом» виде уравнения движения (1) коррективы скорости стоят перед производными скорости, в то время как должны располагаться под дифференциалом [Алабян и др., 2019], так как не являются константами и существенно изменяются в течение приливного цикла (что продемонстрировано в пятой главе):

$$\frac{1}{g} \frac{\partial(\alpha_0 u)}{\partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial(\alpha u)}{\partial x} + \frac{u|u|}{C^2 R} + \frac{h}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Преобразование уравнения (3) посредством дифференцирования произведений скорости течения на ее коррективы приводит к появлению в исходном уравнении (1) двух новых членов, характеризующих изменчивость коэффициента Буссинеска во времени и коэффициента Кориолиса по длине:

$$\frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial \alpha_0}{\partial t} + \frac{\alpha u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{u^2}{g} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{u|u|}{C^2 R} + \frac{h}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

В пятой главе описаны результаты расчетов значений членов уравнения движения (1, 4) и входящих в него параметров в течение полусуточного приливного цикла, включая периоды разворота течений, на основе измеренных уровней и расходов воды в устьях рек Сёмжи и Кянды в 2016 – 2018 гг. (рисунок 4).

Расчет членов уравнения движения проводился с применением конечно-разностной схемы, аналогично схеме, применяемой в одномерных гидродинамических моделях [Panchenko, Alabyan, 2022].

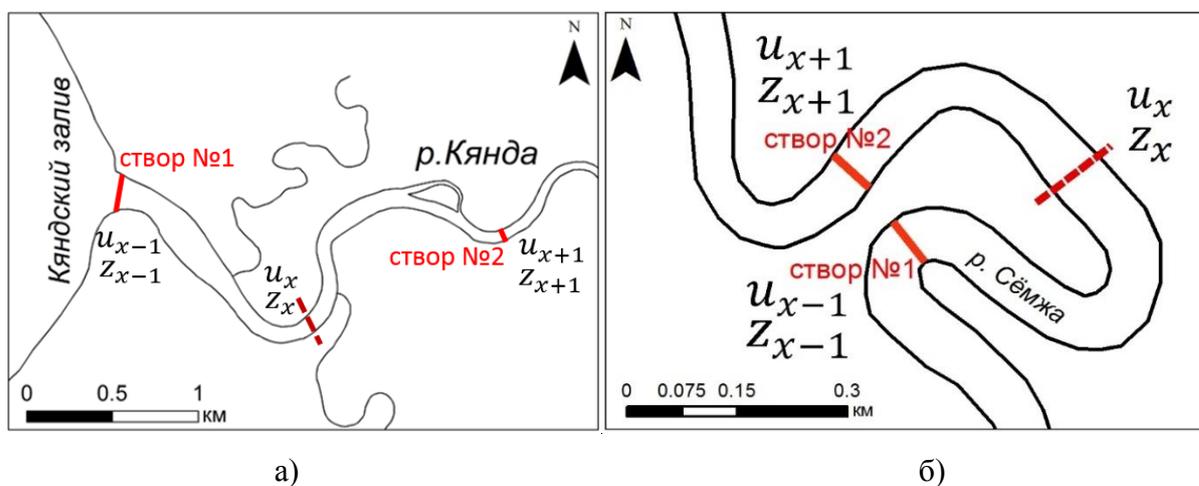


Рисунок 4 – Схема расположения створов измерений и расчетного створа а) на р. Кянде в 2016 г.; б) на р. Сёмже в 2018 г.

Для устьевых участков Кянды и Сёмжи, подверженных влиянию приливов различной величины, были выявлены общие закономерности. В течение приливного цикла инерционные члены и их вклад в уравнение движения изменяются в широких диапазонах, не характерных для участков рек, находящихся вне зоны воздействия приливов (рисунок 5 и 6).

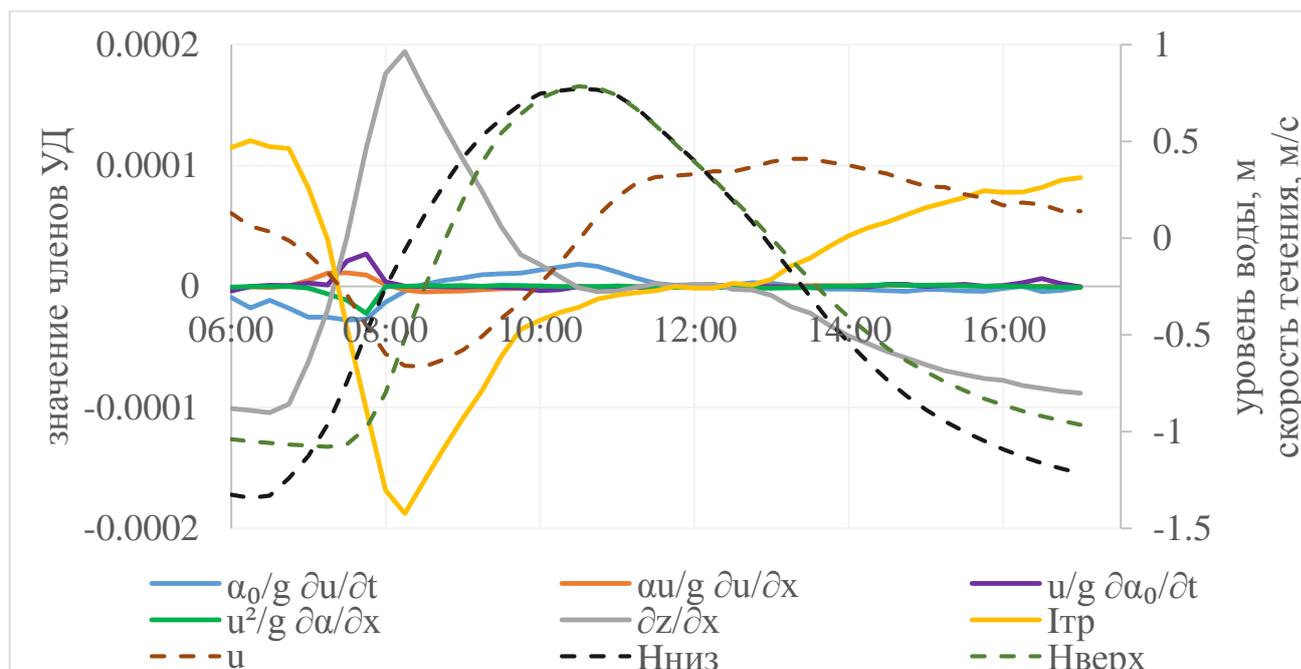
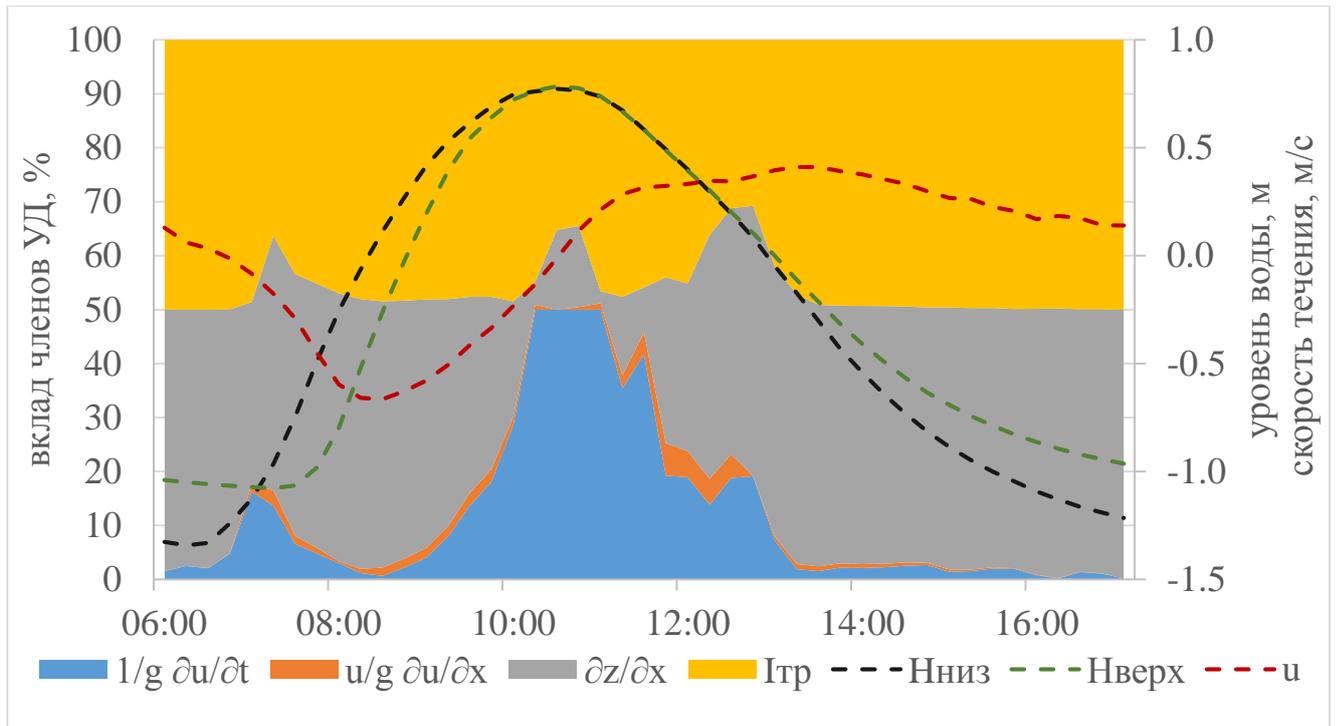
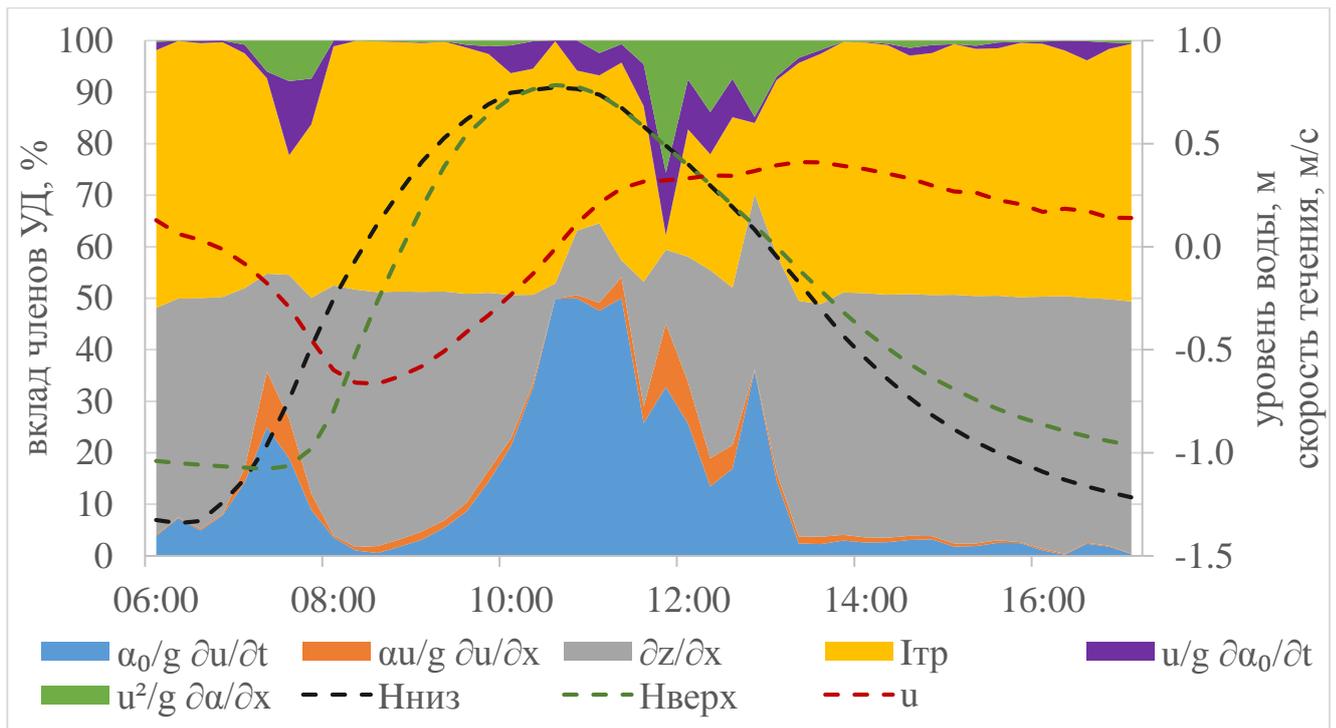


Рисунок 5 – Изменения значений членов уравнения движения, уровней воды и средней скорости течения за приливный цикл 04.08.2016 г. на р. Кянде.



а)



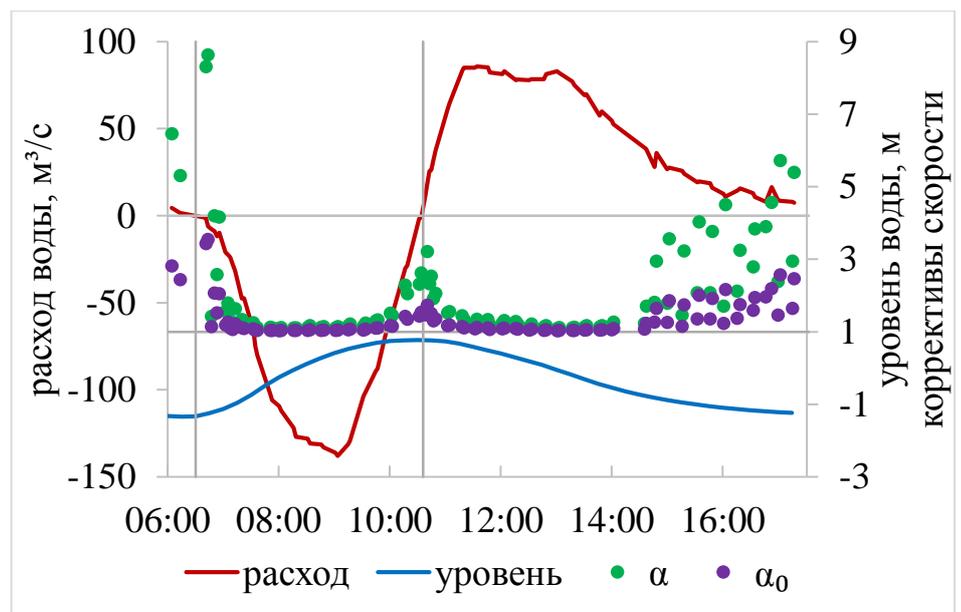
б)

Рисунок 6 – Процентный вклад модулей членов уравнения движения (УД) за приливный цикл 04.08.2016 г. на р. Кянде: а) без учета коррективов скорости и дополнительных инерционных членов; б) с их учетом. Пунктирные линии отражают изменение средней скорости (u) и ход уровня воды в верхнем ($H_{\text{верх.}}$) и нижнем ($H_{\text{низ.}}$) створе.

Хотя большую часть приливного цикла основными действующими силами в потоке являются сила тяжести (характеризуемая геометрическим уклоном) и сила гидравлического сопротивления (характеризуемая уклоном трения), выделяются два периода значительного (от 15 до 50 %) вклада локального и конвективного ускорения. Первый период наблюдается непродолжительно (около получаса) в начале прилива, включая момент смены направления течений, второй – более продолжительно (на Кянде до 3 часов, на Сёмже около 1 часа) в начале отлива, также включая разворот течений.

Коррективы скорости (коэффициенты Кориолиса и Буссинеска, входящие в инерционные члены) также изменяются на несколько порядков в течение приливного цикла, принимая наиболее нетипичные значения именно в периоды, близкие к смене направления течений (рисунок 7).

Рисунок 7 –
Коррективы
скорости, уровни
воды и расход
воды на устьевом
участке Кянды в
августе 2016 г. в
устьевом створе.



Значительную часть приливного цикла значения коррективов скорости находятся в диапазоне 1,0 – 1,2, что является характерным для неприливно-вых участков рек. Однако в периоды, близкие к развороту течений, инструментально зафиксированные значения коэффициентов Кориолиса и Буссинеска достигали своих максимальных значений (например, на Кянде – 8,8 и 3,6 соответственно), а непосредственно в момент разворота течений их значения должны стремиться к бесконечности (исходя из формул для их расчетов, где средняя скорость течения находится в знаменателе).

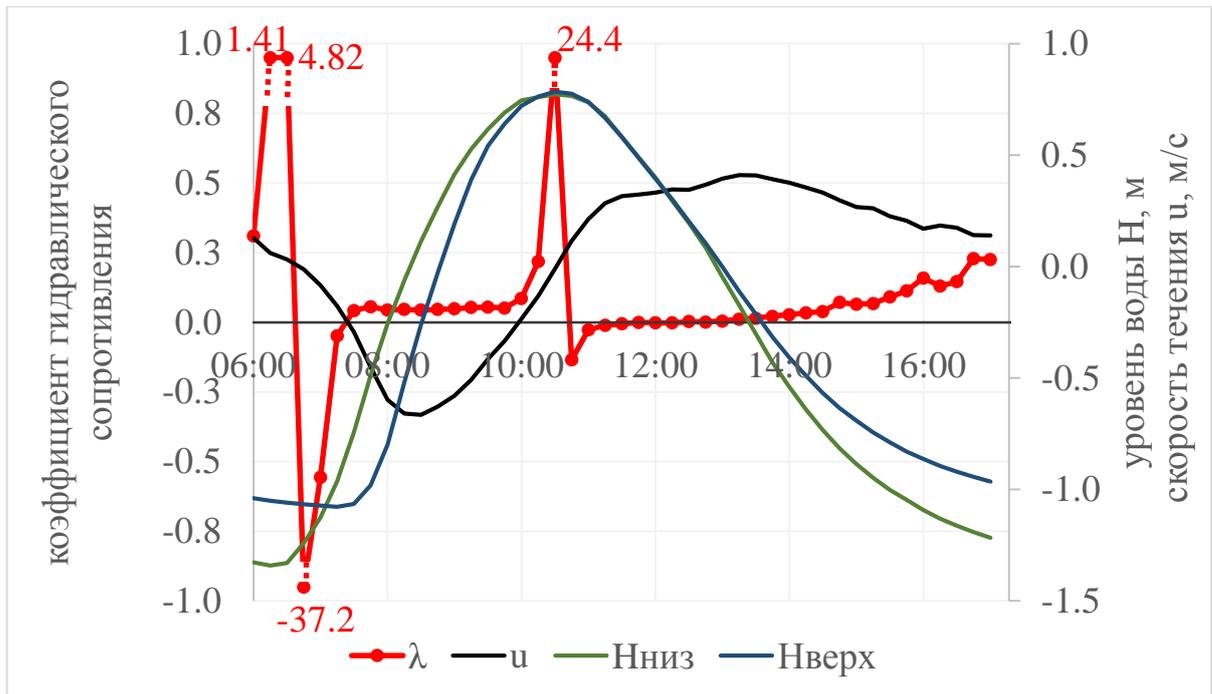
Изменчивость коррективов скорости обуславливает необходимость описанной выше модификации уравнения движения (1) до (4). В среднем за приливный цикл абсолютные значения новых (дополнительных инерционных) членов на порядок меньше значений инерционных членов, однако в начале отлива, когда уклон водной поверхности практически отсутствует, их максимальный вклад по расчетам достигает 15 – 25 % (что примерно соответствует диапазону ошибок при моделировании с использованием HEC-RAS).

При расчетах с учетом коррективов скорости и дополнительных инерционных членов увеличивается продолжительность периодов, когда силы трения в потоке не являются доминирующими (вклад фрикционного члена уменьшается на 3 – 5 % на Сёмже и до 15 % на Кянде).

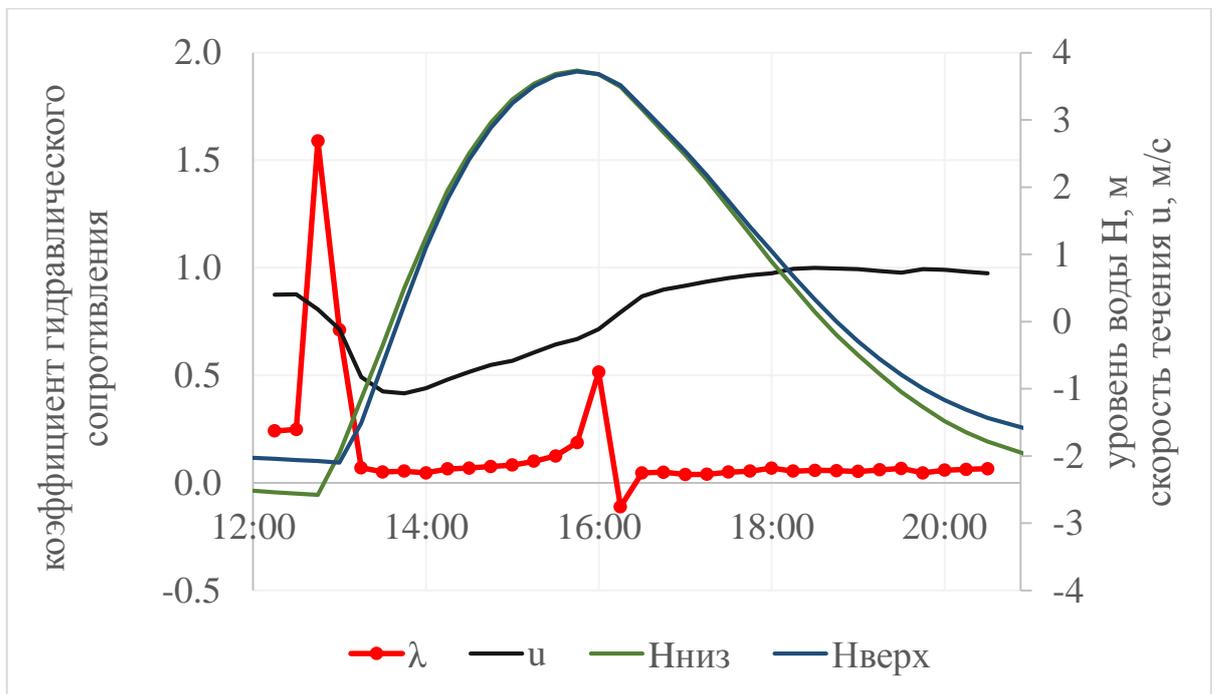
По данным измерений солености и температуры воды было оценено влияние на динамику потока продольного градиента плотности. На Сёмже плотность воды в верхнем и нижнем створе изменялась практически одновременно, за счет чего плотностной уклон в течение всего периода не оказывал влияния на уклон трения. На Кянде абсолютные значения плотностного уклона оказались соизмеримы со значениями конвективного ускорения, и процентный вклад плотностного члена не превышал 1 – 2 % большую часть приливного цикла. Максимальные градиенты плотности наблюдаются в начале прилива и в начале отлива, однако значимость плотностного уклона возрастает только на отливе (достигая 35 %), когда уклон водной поверхности практически отсутствует. При этом «направление действия» плотностного уклона всегда в сторону реки, т.е. разность плотностей воды в реке и море может ускорять только приливное течение и тормозить отливное. При наличии существенного градиента плотности (как на Кянде) его вклад в распределение сил оказался не менее значим, чем вклад дополнительных инерционных членов уравнения движения.

Гидравлическое сопротивление, выражаемое формулой (2), исходя из измеренных значений скорости течения и рассчитанных значений уклона трения, существенно варьирует в течение приливного цикла. На Кянде в 2016 г. коэффициент гидравлического сопротивления λ изменялся в диапазоне от -37,2 до

24,4 (рисунок 8, а), на Кянде в 2017 г. от -0,02 до 1,43, на Сёмже в 2018 г. от -0,11 до 1,59 (рисунок 8, б).



а)



б)

Рисунок 8 – Коэффициент гидравлического сопротивления (λ), средняя скорость течения (u) и уровни воды в верхнем ($H_{\text{верх}}$) и нижнем ($H_{\text{низ}}$) створе в ходе приливного цикла а) на р. Кянде 04.08.2016 г.; б) на р. Сёмже 14.08.2018 г.

В периоды квазиустановившегося течения воды в обоих направлениях в прилив и отлив устанавливаются характерные для рек со сходными морфологическими характеристиками русла значения коэффициента гидравлического трения λ порядка 0,04 – 0,07, а наиболее «нетипичные» значения зафиксированы в моменты смены направления течения. При развороте течений происходит сначала резкое увеличение значения коэффициента гидравлического сопротивления, а потом – резкое уменьшение вплоть до отрицательных значений.

Отрицательные значения были зафиксированы и для Кянды, и для Сёмжи, а первичная оценка возможных ошибок расчета, связанных с инструментальной погрешностью измерений, не отбраковала данные значения [Panchenko, Alabyan, 2022]. Учет дополнительных членов в уравнении движения не препятствует появлению отрицательных значений коэффициента гидравлического сопротивления, а даже наоборот – несколько усиливает это явление (т.к. в первые часы отлива дополнительные члены имеют тот же знак, что и уклон трения). Однако вопрос об «отрицательном трении», наблюдающемся в приливных устьях рек, остается дискуссионным и требует дополнительных исследований.

Отрицательные значения гидравлического сопротивления не противоречат современным представлениям о механизме диссипации энергии в турбулентных потоках. В соответствии с принятой в настоящее время параметризацией гидродинамических процессов передача энергии пульсаций поступательному движению жидкости или газа проявляется в отрицательных значениях коэффициента турбулентной вязкости (турбулентного обмена), когда энергия поступательного движения передается от "более медленных" слоев жидкости к "более быстрым" (с точки зрения средней скорости их поступательного движения). Резкое увеличение значения гидравлического сопротивления перед разворотом течений может отражать аккумуляцию энергии поступательного движения в вихревых образованиях, а их резкое уменьшение – сброс энергии вихрей в поступательное движение водной массы.

В заключении перечислены основные результаты проведенного исследования и сформулированы выводы.

1. Натурные исследования распространения приливной волны вверх по руслу реки в макро-, мезо- и микроприливных устьях больших и малых рек бассейна Белого моря показали, что:

- определяющим фактором трансформации прилива на устьевом участке реки является уклон русла; ледяной покров уменьшает величину прилива вдвое, а также увеличивает асимметрию формы волны; увеличение речного стока тоже приводит к трансформации прилива, хотя для уменьшения высоты приливной волны стоковые расходы воды должны увеличиться в десятки раз;
- фазовая скорость приливной волны должна рассчитываться только по темпам продвижения фронта волны, а не ее гребня, как это принято для волн половодья и паводков; формула Лагранжа не может использоваться даже для приблизительных оценок;
- временные отрезки между экстремумами уровней и разворотом течений в начале прилива после малой воды и в начале отлива после полной воды в межень не превышают 30 минут; при повышенном речном стоке время между началом прилива и разворотом течений увеличивается, а время между полной водой и обратным разворотом течений на отливе, наоборот, сокращается, вплоть до изменения порядка наступления экстремумов;
- период времени между максимальным приливым (отрицательным) расходом воды и максимумом уровня воды составляет более часа для мезо- и макроприливных устьев рек; продолжительность периода между наступлением полной воды и максимальным отливным (положительным) расходом воды имеет максимальный разброс из-за слабой выраженности максимума отливного расхода;
- для характеристики периода постоянства уровней в фазу отлива («бесприливных условий») необходимо введение специального параметра; его значение зависит от строения русла, удаленности от

устьевого створа, величины речного стока и наличия ледяного покрова.

2. Одномерные модели устьевых участков малых рек Сёмжи, Кянды, Лаи, а также эстуария Онеги, разработанные в программном комплексе HEC-RAS, показали, что:

- одномерные модели наилучшим образом воспроизводят скорость продвижения приливной волны, в меньшей степени – амплитуду приливных колебаний уровня и диапазон изменения приливных и отливных расходов воды;
- коэффициенты шероховатости, подобранные в результате калибровки моделей устьевых участков малых рек для их нижних участков, значительно меньше «типичных» значений, характерных для рек со сходным руслом, но с установившимся режимом течений;
- малые значения коэффициентов шероховатости приводят к численной неустойчивости программы, проявляющейся в виде неустранимых нефизичных колебаний уровней и расходов воды, что затрудняет использование HEC-RAS.

3. Расчеты и анализ изменчивости соотношения членов 1D уравнения движения (Сен-Венана) и входящих в него параметров, выполненные для устьевых участков Кянды и Сёмжи за полусуточный приливный цикл, выявили следующие закономерности:

- инерционные члены, а также коэффициенты гидравлического сопротивления и коррективы скорости (коэффициенты Буссинеска и Кориолиса) изменяются в чрезвычайно широких диапазонах, не характерных для участков рек, находящихся вне зоны воздействия приливов;
- наиболее «нетипичные» значения коэффициентов гидравлического сопротивления и коррективов скорости отмечены в периоды, близкие к развороту течений;

- для применения в 1D моделях приливных устьевых участков уравнение движения должно быть модифицировано по предложенной схеме, учитывающей изменчивость коэффициентов Кориолиса и Буссинеска в течение приливного цикла.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности 1.6.16:

1. Алабян А.М., **Панченко Е.Д.**, Алексеева А.А. Особенности динамики вод в приливных устьях малых рек бассейна Белого моря // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2018. № 4. С. 39–48 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.8).
2. **Panchenko E.**, Leummens M., Lebedeva S. Hydrodynamic modelling of the Onega river tidal estuary // E3S Web Conferences. 2020. V.163. doi: 10.1051/e3sconf/202016301008 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.6).
3. Терский П.Н., **Панченко Е.Д.**, Горин С.Л., Агафонова С.А., Василенко А.Н., Куликова Ж.М., Попрядухин А.А., Алабян А.М. Исследования зимнего режима устьев рек Белого моря в 2017-2020 гг // Океанология. 2021. Т. 61. № 6. С. 1006–1008 (Wos, Scopus, IF (CiteScore) = 1.3)
4. **Panchenko E.**, Alabyan A. Friction factor evaluation in tidal rivers and estuaries // METHODSX. 2022. V. 9. P. 101669 (Scopus, IF (CiteScore) = 1.8).

Иные публикации:

21 работа в других рецензируемых журналах, сборниках тезисов и материалов российских и международных конференций. Их полный список доступен на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/profile/ZheniyaPanchenko/>.