МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему **Моделирование приливной волны в устьевой области реки Мезень**

Исполнитель Звегинцев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.ф.-м.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Саноцкая Надежда Александровна.
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

к.г.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«10» июня 2019 г.

Санкт–Петербург
2019

Введение

Устьевые области рек считаются самостоятельным водным объектом, как и любые другие водные объекты, они играют важнейшую роль в формировании природных условий планеты и в развитии человеческого общества. Являясь достаточно сложной системой на стыке реки и моря, устьевая область способна аккумулировать в себе не только соленую, но и пресную воду в значительных объемах, именно поэтому последнее время устья рек являются актуальной темой для изучения. Главную роль в изучении закономерностей их функционирования играют гидрологические исследования. Методические приемы гидрологии, океанологии и гидрографии позволяют стандартизировать процесс описания, измерения и составления физико-географической характеристики данных объектов. В свою очередь мы получаем информацию, на основании которой можно корректно оценивать их роль мировой экосистеме, допустимый уровень антропогенной нагрузки на водоем, вырабатывать рекомендации по его охране и рациональному хозяйственному использованию.

Компьютерное моделирование в нашей стране имеет массу проблем, связанных и с недостаточным финансированием и труднодоступностью компьютерных программ отечественного производства. Однако компьютерное моделирование во всем мире в целом развивается очень быстро. Разрабатываются все новые программные комплексы с более широкими возможностями моделирования. Данная работа посвящена исследованию зарубежных программных комплексов и оценка их эффективности на примере устьевой области р.Мезень.

Целью работы является оценка возможностей моделирования устьевых процессов в эстуариях при помощи компьютерного моделирования.

Главной задачей работы является выработка методики по получению пространственной информациидля устьевой области реки, с дальнейшим ее применением в программном комплексе HEC-RAS.

Объектом исследования является устьевая область р.Мезень. Предметом исследования являются процессы в устьях эстуарного типа.

Работа состоит из 4 разделов, в первом разделе освещается физико-географическая характеристика района исследования.

Второй раздел включает в себя общие сведения о моделировании в эстуарных областях.

Третий раздел посвящен изучению методов получения пространственной информации.

В четвертом разделе рассматриваются возможности программного комплекса HEC-RASи возможности его применения в моделировании устьевых процессов.

1 Физико-географическая характеристика территории

Река Мезень протекает по территории двух субъектов Российской Федерации – Республики Коми и Архангельской области. Являясь одной из самых крупных рек европейского Севера России и Арктической Зоны Российской Федерации, Мезень принадлежит к бассейну Белого м оря (Рисунок 1.1).

Рисунок 1.1 – Район протекания реки Мезень.

Длина реки составляет 966 километров, площадь водосбора – более 78 тысяч квадратных километров.

Исток реки Мезень – болота в Республике Коми, которые расположены на западном склоне Четласского камня (отрог Тиманского кряжа). Высотная отметка истока – 370 м (Рисунок 1.2). Река делает изгиб и поворачивает сначала на запад, затем меняет свое направление на северное и протекает по территории Архангельской области. После слияния с рекой Вашкой Мезень резко поворачивает на север. Устье реки Мезень – Мезенская губа Белого моря. Уклон реки составляет 0,383 ‰.

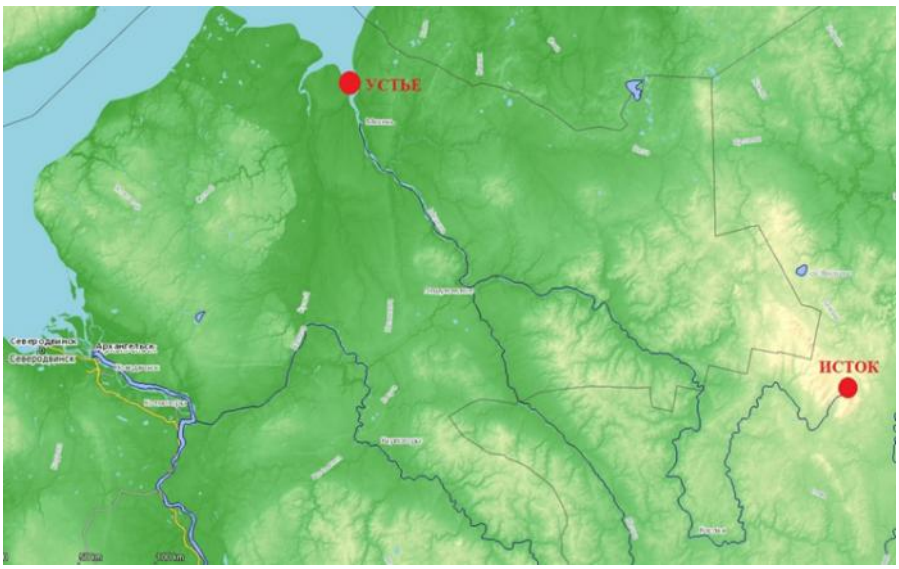


Рисунок 1.2 - Район протекания реки Мезень.

1.1 Рельеф и геологическое строение

Участок исследования расположен на северо-востоке Русской плиты (Восточно-Европейской платформы) в северной части Мезенской синеклизы, которая является крупнейшей отрицательной структурой (прогибом) на этой части Русской плиты (Рисунок 1.3). Данная синеклиза является одной из наименее изученных структур в России.С юго-востока примыкает к Балтийскому щиту, на востоке и северо-востоке ограничивается Тиманской грядой. С юго-востока ограничена Сысольским сводом Волго-Уральской антеклизы. Была выделена в 40-х годах XX века по верхнепалеозойским и мезозойским отложениям. Общая площадь синеклизы составляет более 300 тысяч квадратных километров. Две трети её площади занимают Важский и Вашкинский неотектонические своды.

Рисунок 1.3 – Геологическая схема района протекания р.Мезень.

Осадочный чехол в районе Мезенской синеклизы представлен верхнепротерозойскими, палеозойскими и (в небольшом объёме) кайнозойскими отложениями. Мощность толщи рифейских пород составляет до 10 километров, выделяющиеся выше отложения венда и палеозоя имеют мощность около 2 – 2,5 километров. Они перекрывают мощный рифейский комплекс почти горизонтально.

Высоты гор Тиманского кряжа, на склонах которого берет своё нача ло река Мезень, достигают 471 м. Тиманский кряж протяженностью более 900 километров – естественный водораздел Двинско-Печорского бассейна.

В верхнем течении реки наблюдается узкая долина шириной до 1 километра, двухсторонняя пойма, также не широкая. Берега высокие и скалистые.

После пересечения отрогов Тимана глубина вреза долины резко возрастает (до 70 метров). Русло расширяется от 8 до 40 м. После впадения рекиИрвы ширина долины составляет уже от 2 до 5 километров, а высота коренных берегов 35 метров и меньше, ширина поймы увеличивается до 3 километров. Между устьями Ирвы и Пыссы наблюдается множество перекатов, пять порогов и 14 островов.

В среднем течении на участке Мезени от устья Кымы до устья Вашкирусло реки сильномеандрирует. Последние пороги на Мезени находятся в районе устья реки Кымы. Правый берег здесь заметно выше и круче, в обрывах вскрываются разноцветные мергели.

Нижнее течение реки – участок от устья Вашки. Русло реки расширяется до полутора километров (в устье до 2,5 км). Берега обрывистые, высоток более 30 метров.

На р. Мезени много островов, песчаных отмелей.

1.2 Почвы и растительный покров

Материковая часть Архангельской области (без Ненецкого Автономного Округа и полярных островов) представлена в основном почвами лесной зоны и лишь на севере в Мезенском районе тундровыми почвами. Поскольку равнинный водораздел хорошо дренируем, увлажнение нормальное, там сложились все условия для формирования почв автоморфного ряда. К таким относятся подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые на песчаных и супесчаных моренных и флювиогляциальных отложениях (они имеют наибольший хозяйственный интерес, так как распространены на гораздо больших территориях), а также подзолистые почвы на двучленных наносах, их верхняя супесчаная часть на глубине 30 - 50 см подстилается моренным суглинком. Почвы на известняковых породах– подзолистые легкосуглинистые остаточно карбонатные, дерново-подзолистые и дерново-карбонатные почвы, являются самыми ценными из автоморфного ряда.

Около 30 процентов почвенного покрова данной области представлено полугидроморфными почвами, которые характеризуются периодическим переувлажнением поверхностными водами и подземными грунтовыми подами. К таким относятся глееподзолистые и болотно-подзолистые почвы, которые сформировались в северной части области, и распространенные на юге дерново-глеевые и перегнойно-глеевые почвы.

Чуть меньше 20 процентов региона протекания Мезени представлены гидроморфными почвами, они избыточноувлажнены поверхностными и грунтовыми водами. На водоразделах, повышениях рельефа такими являются торфяные болотные почвы, а именно верховые и переходные торфяные почвы. В понижениях мезорельефа на водоразделах и в поймах рек сформировались низинные торфяные почвы, которые имеют гораздо меньшее распространение.

Также на территории наблюдаются нехарактерные для лесной зоны данной области интразональные почвы, занимающие до 5 % территории. Формирование таких почв связано с местными особенностями рельефа, материнскими породами и близостью водоёмов. К таким нехарактерным почвам относятся пойменные (аллювиальные) почвы и почвы в приливно-отливной полосе устьях рек, засоленные маршевые почвы на побережье Белого и Печорского морей.

Заболоченность территории равна 17 %, поэтому и почвы в устьевом участке реки Мезень в основном подзолистые и болотные. Кроме того, здесь встречаются пески, широкой полосой пролегающие от склонов Тиманского Кряжа до водораздела Мезени и ее притока Вашки. В районе Тимана встречаются перегнойно-карбонатные почвы.

1.3 Основные сведения о гидрографии бассейна р.Мезень

Река Мезень берет начало на западных склонах Четласского Камня, относящегося к Среднему Тиману, и впадает в Мезенскую губу Белого моря. Длина реки - 966 километров, площадь водосбора вместе с бассейном р. Вашки, впадающей в р. Мезень с левого берега на двести первом километре от ее устья, составляет 78 тысяч квадратных километров .

Речная сеть в бассейне хорошо развита. Средняя густота русловой сети в бассейне реки Мезени - 0,64 км/км^2. В реку впадают 15187 притоков разной крупности (рек и ручьев), из них 103 притока являются основными (53 левых и 50 правых).

Через реку Пижма Мезенская, которой свойственно явление бифуркации – раздвоения русла, река Мезень связана с бассейном реки Печора. Пижма Мезенская может течь как в Мезень, так и в Печору.

Притоки перечислены в Таблице № 1 по порядку от устья к истоку, также указаны км от устья.

Таблица 1 – Притоки р.Мезень от устья к истоку.

Приток по порядку от устья	Приток по порядку от устья
5 км: река Ольховка	372 км: река Лэба (Леба)
5 км: река Сёмжа	374 км: река без названия
22 км: река Пыя	390 км: река Мезенская Пижма
29 км: река Чеца (Нижняя Чеца)	393 км: река без названия
41 км: река Каменка	395 км: ручьи Зубова (руч. Зубов)
42 км: водоток прот. без названия	412 км: ручей Гремячий (Грубой)
51 км: водоток рук. без названия	413 км: река Кыртей (Ыджыд-Кыфтью)
65 км: река Шукша	416 км: река Вёза
73 км: река Старая Кимжа	428 км: река Курмыш
81 км: река Кимжа	430 км: река Большая Виска
86 км: река Пёза	437 км: река Лотьюга (Латюга)
91 км: река Жердь	442 км: река Барма
100 км: водоток рук. Печищенский Полой	453 км: ручей Бычим-Ёль (Бычим-ю)
128 км: река Верхняя Целега	454 км: ручей Мыт-Пыв-Ёль

Приток по порядку от устья	Приток по порядку от устья
136 км: водоток прот. без названия	455 км: река Пысса (Тыса)
143 км: река Палуга	470 км: ручей Туп-Ёль
151 км: река Большая Кеслома	476 км: река Уип-Ю
151 км: река Рочуга	480 км: ручей Вэвлез-Ёль (Вевлез)
155 км: водоток прот. Копыльский Полой	492 км: река Мудз-Ю (Муча)
157 км: река Малая Кеслома	498 км: река Керь-Ю
165 км: река Юрома	499 км: река Вежа-Ю (Вежа)
173 км: река Кельчема (Керчема)	507 км: река Села-Лопи
178 км: река Ерчема (Елчема)	523 км: река Уип
195 км: ручей Большой	542 км: река Войсас-Ю
196 км: река Ежуга	545 км: река Лэба (Леба)
201 км: река Вашка	550 км: река Борсег
207 км: река Едома	552 км: река Сёль
216 км: река Пожа	566 км: река Лёкшор
221 км: река Пылема	574 км: река Пежью (Лежью)
225 км: река Ираса (Ирос, Ироса, Юроса)	586 км: река Ус
225 км: река Колмогорская Курья	603 км: река Малая Ирыч
242 км: река Она	608 км: река Большая Ирыч
242 км: река Цебьюга (Цеблюга)	618 км: река Большая Лоптюга (Бол. Лоптюг)
254 км: река Кома	631 км: река Малая Лоптюга
266 км: река Коч	653 км: река Ирва
268 км: река Хетея	671 км: река Ув-Ю
272 км: ручей Горевой (Гаревой)	693 км: река Вожаль
276 км: река Нижняя Сезя	700 км: река Малая Севк
282 км: река Попьюга	708 км: река Большая Севк (Бол. Севка)
286 км: река Цебьюга (Чебьюга, Чеблюга)	712 км: ручей Комысь-Видз-Ёль
288 км: река Манбас	715 км: река Комысь
306 км: река Мутусья (Мутасья, Мутусь, Мутося)	729 км: река Удж-Ю
308 км: река Манбас (Мамбасс)	737 км: река Лупт (Луп)
315 км: река Кыма (Кымь)	739 км: ручей Кома-Ёль
321 км: река Сельзя (Сельза)	747 км: река Ёлва-Мезенская
324 км: река Неньга	751 км: река без названия
329 км: ручей Койнас (руч. Койнасс)	783 км: река Южный Песъю (Большая Песья)
332 км: река Ноба	806 км: река без названия
337 км: река Сула	823 км: река Кривая

Приток по порядку от устья	Приток по порядку от устья
339 км: река Карва	826 км: река без названия
343 км: река Карва (Кирва)	839 км: река Нижняя Пузла (Пузла)
347 км: река Низьма (Низима)	848 км: река Тыд
349 км: река Кысса	848 км: река Шимур (Щишер)
352 км: ручей Карпов	876 км: река Верхняя Пузла (Каменная Пузла)
360 км: река Кузига (Кузега)	888 км: река Увью
361 км: река Выбор (Выбера)	908 км: река Язиньга
362 км: ручей Домашний	929: река без названия

1.4 Гидрологический режим р.Мезень

Для реки Мезень характерно снеговое и дождевое питание с преобладанием весеннего стока. Водный режим Мезени, сток которой не зарегулирован, отличается большими сезонными колебаниями расходов воды и уровней. Половодье начинается в мае – июне, летом и осенью нередки дождевые паводки, приводящие к кратковременным, но значительным подъёмам уровня воды.

Средний расход в устье составляет 886 кубических метров в секунду, среднегодовой – 27,9 кубокилометров в год.

В верхнем течении (у деревни Макариб) расход ее в весеннее половодье увеличивается более чем в 100 раз, если сравнивать с меженным расходом. За многолетний период наблюдений максимальное его значение составило 1740 м³/с. Это почти в три раза больше среднего годового расхода воды на судоходном участке Мезени в нижнем течении, у деревни Малонисогорское. Верхнее течение реки в какой-то мере зарегулировано карстом, средняя годовая величина модуля стока здесь на 7% ниже зональной величины. Дождевые паводки в верхнем течении Мезени тоже бывают высокими. В десятки раз увеличивается после дождей сток в реке по сравнению с летним меженным. Максимальный расход воды у деревни Макариб во время дождевого паводка достигал 510 м³/с.

И в нижнем течении Мезени сезонные колебания уровня и расхода воды довольно значительны. У деревни Малонисогорское, например, в 1971 году расход воды в половодье достигал 6150 м³/с, а в летнюю межень снижался до 125 м³ /с. Наибольший расход воды там был отмечен 2 июня 1952 года — он достиг 9530 м³/с, минимальный был зарегистрирован с 17 по 21 марта 1938 года — он составлял всего 87,1 м³/с. При этом уровни воды в Мезени у деревни Малонисогорское изменялись от 759 см над нулем водомерного поста (7 мая 1943 года) до 101 см (5—6 августа 1954 года). Похожая амплитуда изменений уровня воды в реке ниже по течению (у деревни Дорогорское). Наибольший уровень воды в Мезени здесь превысил нуль водомерного поста на 787 см (10мая 1959 года), наименьший — на 120 см (7 сентября 1947 года).

Морские приливы и отливы в устьевой области реки Мезень вызывают колебания уровня воды близкие по величине к сезонным изменениям. Приливная волна распространяется вверх по Мезене более чем на 90 км со скоростью около 2 км/ч. Наносы, которые несет река, тут же вымываются из ее низовий сильными приливно-отливными течениями и уносятся в море.

Уровенный режим воды в низовьях Мезени определяется в основном влиянием моря. При высоких приливах и нагонах воды с моря вода в реке даже в летнюю межень поднимается до отметок весеннего половодья. Только выше по течению, где влияние моря уже не ощущается; водный режим Мезени определяется обычными для рек Северной края сезонными колебаниями: высоким половодьем, низко зимней и летней меженью, которая зачастую прерывается дождевыми паводками.

Обычно Мезень замерзает сначала в верхнем течении, а затем ледостав распространяется вниз по реке. Средняя дата замерзания реки у деревни Макариб — 8 ноября, у деревни Малонисогорское — 9 ноября, а у деревни Дорогорское — 12 ноября. Осенью и в начале зимы на реке часто наблюдаются зажоры льда. У деревни Малонисогорское 3 ноября 1942 года в результате образовавшегося зажора уровень воды в Мезени поднялся на 3,6

метра над меженным, а у деревни Койнас 29 ноября 1957 года превышение меженного уровня составило 1,1 метра.

Вскрытие Мезениначинается сначала в верховьях и в нижнем течении, на участке среднего течения зимний покров держится несколько дольше. Весной на Мезени время от времени возникают заторы льда на поворотах с малой величиной углов и у островов, что характерно для многих рек, текущих с юга на север. В верхнем течении Мезени заторы обычно возникают в крутых излучинах в нескольких километрах от деревни Макариб, в среднем — возле островов между деревнями Большая Пысса и Латьюга, а в нижнем — у островов в районе деревень Малонисогорское, Бугаевевкое, Дорогорское и Лампожня. У деревни Малонисогорское вызванный затором льда подъем воды 7 мая 1943 года превысил уровень самого высокого из наблюдавшихся там половодий, который был зафиксирован 2 июня 1952 года,на 0,6 метра.

К 14 мая обычно у деревни Малонисогорское река освобождается от ледяного покрова полностью. Середина мая – начало навигации на Мезени. Весной суда поднимаются вверх по течению реки до деревни Макариб, которая находится в 680 километрах от устья. Но в летний период Мезень бывает судоходна только в нижнем течении на протяжении 300 км — от пристани Каменки до реки Вашки. На всем протяжении верхнего и среднего течения в такие периоды реку местами можно перейти вброд.

1.5 Климат р.Мезень

Ввиду большой протяженности территории с севера на юг и с запада на восток и большого разнообразия физико-географических условий, наблюдается большое различие климата отдельных частей района протекания реки Мезень. Малое количество солнечной радиации зимой, влияние северных морей и интенсивного западного переноса, который обеспечивает вынос влажных морских воздушных масс (холодных летом и

теплых зимой) с Атлантического океана, а также местные физико-географические особенности территории, формируют климат данной области. Приходно-расходный баланс тепла и влаги, в общих чертах который определяется радиационными и циркуляционными факторами, в значительной мере зависит от характера подстилающей поверхности и рельефа. Режим каждого климатического элемента – температуры воздуха и почв, атмосферных осадков, ветра, облачности и других, весьма своеобразен по причине того, что климатообразующие факторы характеризуются здесь весьма сложным взаимодействием.

Средняя годовая температура воздуха в Мезенском и Лешуконском районах отрицательная (от -0,4 до -1,2°С), в остальных районах – слабо положительная (0,1-2,0°С). Продолжительность холодного, когда средняя температура воздуха ниже 0°С, и теплого, когда средняя температура воздуха выше 0°С, периодов по территории изменяются от 197/168 до 165/200 дней, соответственно. В Мезенском, Лешуконском и на севере Пинежского района холодный период длиннее теплого на 3-29 дней, на остальной территории обратная картина – теплый период длиннее холодного на 3-35 дней. Начало теплого периода на юге – начало апреля, на севере – последняя декада апреля – начало мая. Осенний отрицательный переход средней суточной температуры воздуха через 0°С происходит во второй-третьей декадах октября. Годовой ход температуры воздуха однотипен по всей рассматриваемой территории, но амплитуда заметно различается. На побережье разность температур воздуха самого холодного и самого теплого месяцев составляет 20-24°С, в континентальных районах – 29-33°С. Самый теплый месяц года - июль, самый холодный – январь. На побережье зима более мягкая, средняя температура за сезон от -8 до -10°С. По мере продвижения в глубь территории ее континентальность возрастает и средняя температура за зиму равна уже от -11 до -14 °С. В отдельные дни температура воздуха понижается до -55 °С на востоке и северо-востоке, до -42°С на побережье. Летом направление понижения температуры воздуха - с

юга на север. Средняя температура за лето изменяется от 14 -15°С в южных и центральных районах до 10-12°С на севере. Максимальная температура воздуха достигает 33-36°С.

Средняя максимальная температура характеризует послеполуденные часы, то есть самую теплую часть суток, средняя минимальная – температуру наиболее холодной части суток или ночные часы. Годовой ход средней максимальной и минимальной температуры воздуха почти совпадает с годовым ходом средней месячной температуры (Рисунок 1.4).

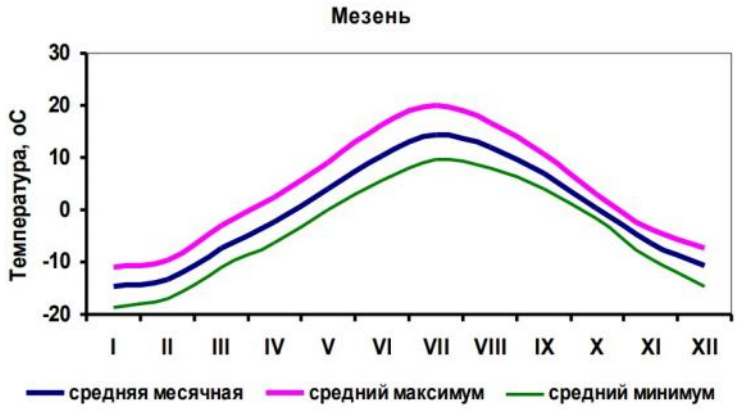


Рисунок 1.4 – Годовой ход температур.

Сезонное состояние поля атмосферного давления определяет географическое распределение различных направлений ветра и его скоростей. Исландский минимум формирует ветровой режим рассматриваемой области в холодное время года. В период сентябрь - март преобладают ветры южной четверти – юго-восточные, южные, юго-западные. В апреле равновероятны ветры как южной, так и северной четверти. Интенсивность общей циркуляции атмосферы над всем Северным полушарием уменьшается в летний период с мая по сентябрь.

Местные особенности рельефа оказывают свое влияние на ветровой режим, хотя в целом за год на большей части области преобладают ветры южной четверти(Рисунки 1.5–1.6).

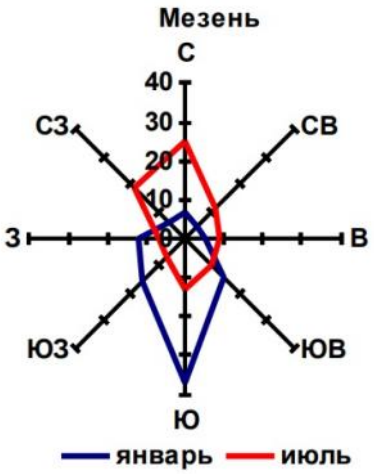


Рисунок 1.5– Роза ветров январских и июльских направлений ветра.

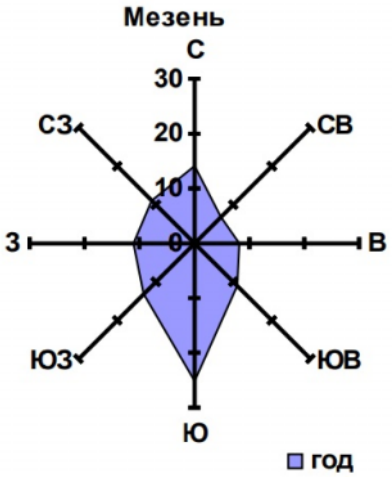


Рисунок 1.6 – Роза ветров за год.

Наибольшие средние годовые скорости ветра естественно наблюдаются на побережье, при продвижении к югу увеличивается защищенность территории, скорости ветра существенно снижаются ввиду наличия густой леснойрастительности и построек населенных пунктов. Годовой ход средней месячной скорости ветра гораздо более четко и заметно выражен на побережье моря, нежели в континентальных районах. Циклоническая деятельность в Северном полушарии наиболее активна в осенне-зимний период, соответственно и наибольшие скорости ветра наблюдаются именно в это время. Годовые колебания средних месячных скоростей ветра достигают 2 м/с на побережье и менее 1 м/с при -

продвижении в глубь территории. Наименьшая средняя месячная скорость ветра чаще всего фиксируется в июле или августе.

Активная циклоническая деятельность определяет характер выпадения атмосферных осадков над рассматриваемой территорией. Особенно обильные осадки приносят южные циклоны. При западных циклонах осадки имеют меньшую интенсивность, но большую продолжительность.

Минимум осадков в годовом распределении приходится на зимние месяцы и начало весны. Максимум осадковчаще всего наблюдается в июле-августе (Рисунок 1.7). Амплитуда годового хода колеблется в пределах 40-50 миллиметров. В теплый период с апреля по октябрь выпадает от 60 до 70 % годового количества осадков. Обычно наибольшие значения суточного максимума (наибольшей суммы осадков, выпавших в течении метеорологических суток) наблюдаются в те же месяцы, на которые приходятся и наибольшие суммы осадков в году, то есть на июль - август. Во время сильных ливней, характеризующихся интенсивной водоподачей, за сутки может выпасть количество осадков равное месячной норме или даже превышающей ее.

Годовое число дней с осадками менее 0,1 миллиметра по территории распределено следующим образом: на побережье - 190-200 дней, при удалении от моря - от 200 до 220 дней. Исходя из распределения по месяцам делаем вывод, что чаще всего осадки отмечаются в осенне-зимний период.

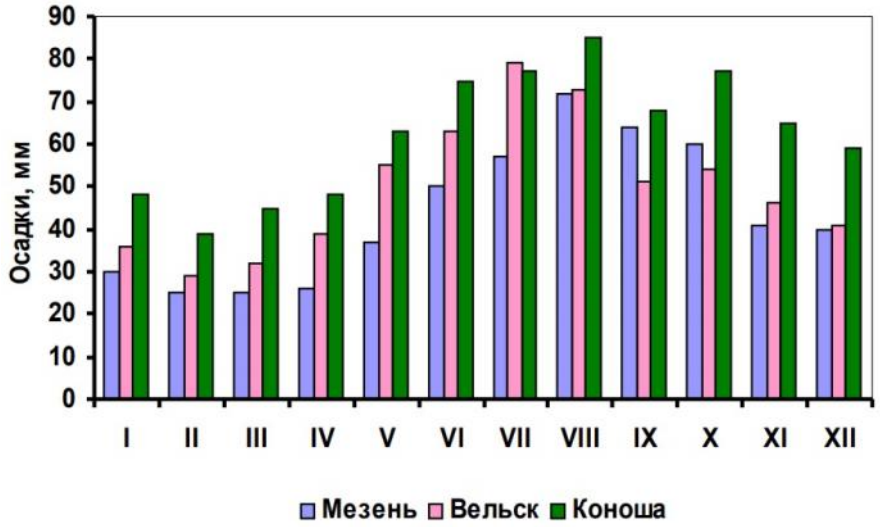


Рисунок 1.7 – Годовое распределение осадков.

Относительная влажность воздуха представляет собой отношение парциального давления водяного пара, содержащегося в воздухе, к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах, и характеризует степень насыщения воздуха водяным паром. Значение этой величины является важной характеристикой влажности. Относительная влажность воздуха естественно выше на побережье, снижается по мере удаления от моря. Максимальное значение относительной влажности наблюдается в октябре – ноябре, минимальное – весной или в начале лета (Рисунок 1.8). Амплитуда годового хода возрастает с удалением от моря с 7% до 20-24%.

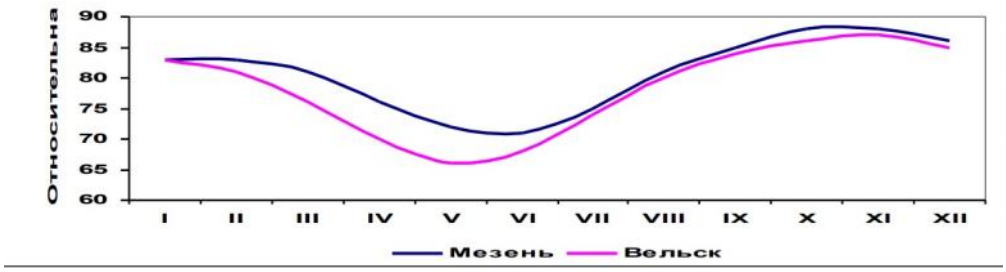


Рисунок 1.8 - Годовое распределение влажности.

Более детальное рассмотрение вопроса относительной влажности производится с помощью такой характеристики, как число дней с влажностью 80% и более (влажные), 30% и менее (сухие). Годовой ход числа влажных дней почти аналогичен ходу средней относительной влажности с

максимумом в осенне-зимний период и минимумом в весенне-летний. Число дней за год с относительной влажностью больше или равной 80% растет по мере приближения к морю: от 140-160 до 220-235 дней. На побережье сухие (дни, когда наблюдается относительная влажность меньше или равная 30%) исключительно редки. В удалении от моря количество сухих дней возрастает. Чаще всего они наблюдаются в весенне-летний период.

Снежный покров на севере и востоке области залегает в течение 180-200 дней, на юге и западе 170-180 (Рисунок 1.9). На севере устойчивый снежный покров образуется уже в конце октября, на остальной территории – в начале ноября. Ранее разрушение устойчивого снежного покрова происходит на юге – в середине апреля. В северных районах этот процесс затягивается до начала мая.

Рисунок 1.9 - Число дней со снежным покровом (1), число дней без снежного покрова (2).

С октября по май наблюдаются метели, иногда метели фиксируют и в июне, и в сентябре. Грозы, характерные для тёплого времени года, иногда случаются и в зимний период. Выпадение града довольно крупных размеров обычно сопровождается сильными ливнями, шквалистым ветром.

2 Моделирование процессов в устьевых областях рек

2.1 Общие сведения о моделировании

Моделирование представляет собой исследование каких – либо конкретных объектов познания на их моделях; заключается в построении и изучении моделей реально существующих объектов, процессов или явлений. Целью моделирования является получение объяснений этих явлений, а также предсказание явлений, которые представляют интерес для исследователя.

Гидрологическое моделирование – это упрощение и абстрактное представление отдельных частей гидрологического цикла. Гидрологические модели чаще всего используются для прогнозирования, а также для понимания сути гидрологических процессов.

Модель – это такой материальный или мысленно представляемый объект, в процессе изучения замещающий объект-оригинал, при этом сохраняя наиболее важные для данного исследования черты, характеризующие реальный объект. Само слово «модель» произошло от латинского слова «modulus», означающего «мера», «образец». Первоначальное значение слова «modulus»было связано со строительным искусством, и во многих языках оно употреблялось для обозначения образа, прообраза, или вещи, сходной по тем или иным характеристикам с другой вещью.

Человек применяет модели при изучении сложных явлений, процессов, конструировании новых сооружений из-за ее доступности для исследования по сравнению с реальным объектом. Более того, некоторые объекты вообще не могут быть изучены непосредственным образом: недопустимы, например, эксперименты с экономикой страны в познавательных целях; принципиально неосуществимы эксперименты с прошлым или, скажем, с планетами Солнечной системы. Хорошо построенная модель делает исследование всех этих процессов, явлений и объектов возможным.

Модель даёт возможность научиться правильно управлять объектом, используя различные варианты управления на модели этого объекта. Эксперименты с реальным объектом в лучшем случае бывают неудобны, а зачастую просто вредны, опасны или вообще невозможны в силу большой продолжительности эксперимента во времени, риска привести объект в нежелательное и необратимое состояние и других причин.

Моделирование – процесс построения интересующей модели,а затем и изучения строения и свойств оригинала с помощью модели.

С совершенствованием вычислительной техники и широким распространение персональных компьютеров перед моделированием открылись огромные перспективы и возможности для исследования процессов и явлений окружающего мира, в том числе и гидрологических.

Видов моделирования огромное количество, существуют, например, математические, графические и имитационные модели.

Математические модели-это знаковые модели, описывающие определенные числовые соотношения.

Графические модели представляют собой визуальное представление объектов, которые настолько сложны, что их описание иными способами не дает человеку ясного понимания. Здесь наглядность модели имеет наибольшее значение для исследователей.

Имитационные модели позволяют наблюдать изменение поведения элементов системы-модели, проводить эксперименты, изменяя некоторые параметры модели, они также дают возможность учитывать наличие дискретных или непрерывных элементов, нелинейные характеристики, случайные воздействия и др. Поэтому этот метод широко применяется на этапе проектирования сложных систем.

Компьютерное моделирование - термин, который всё чаще и чаще используется в современном мире,это математическое моделирование с использованием средств вычислительной техники.

Компьютерные модели способны соответствовать моделируемому объекту и по свойствам, и по структуре. При этом имеется однозначное и явное соответствие между процессами, получаемыми на модели, и процессами, протекающими на объекте. Недостатком имитационного моделирования является большое время решения задачи для получения результатов хорошей точности.

2.2 Устьевые области АЗРФ

Устьевые области рек Арктической зоны Российской Федерации представляют самостоятельный и особый интерес для водообеспечения населения и хозяйственной деятельности. В соответствии с ГОСТ 17.1.1.02 - 77 «Классификация водных объектов» устьевые области рек относятся к поверхностным водным объектам суши и являются самостоятельными водными объектами, наряду с озерами, водохранилищами, болотами и т.п. Они находятся полностью на территории РФ и являются объектами водного фонда, водные ресурсы которых используются или могут быть использованы.

На рисунке9 представлена схема основных устьевых процессов и действующих на них факторов.

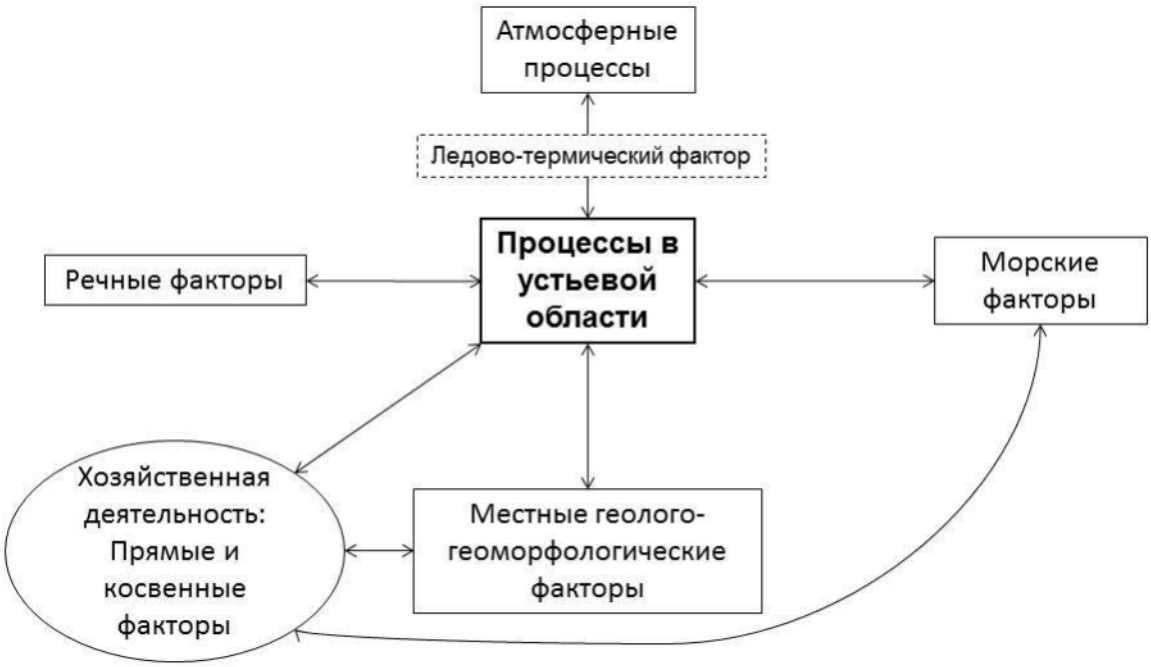


Рисунок 2.1— Факторы, определяющие устьевые процессы в устьевых областях Российской Арктики.

Представленная схема (рис.2.1) разработана для устьевых областей рек не приливного типа. Использование этой схемы для приливных устьевых областей не является достаточно обосно ванным.

Устьевая область эстуарного типа по своему названию подразумевает, что в устьевой области наблюдаются приливные явления. Соответственно, рассмотрим особенности протекания процессов в таких устьевых областях с учетом приливов.

Приливные волны, входящие в эстуарии, распространяются на значительные расстояния. Нана р. Мезень (Рисунок2.2) прилив распространяется на 96 км вверх по течению.

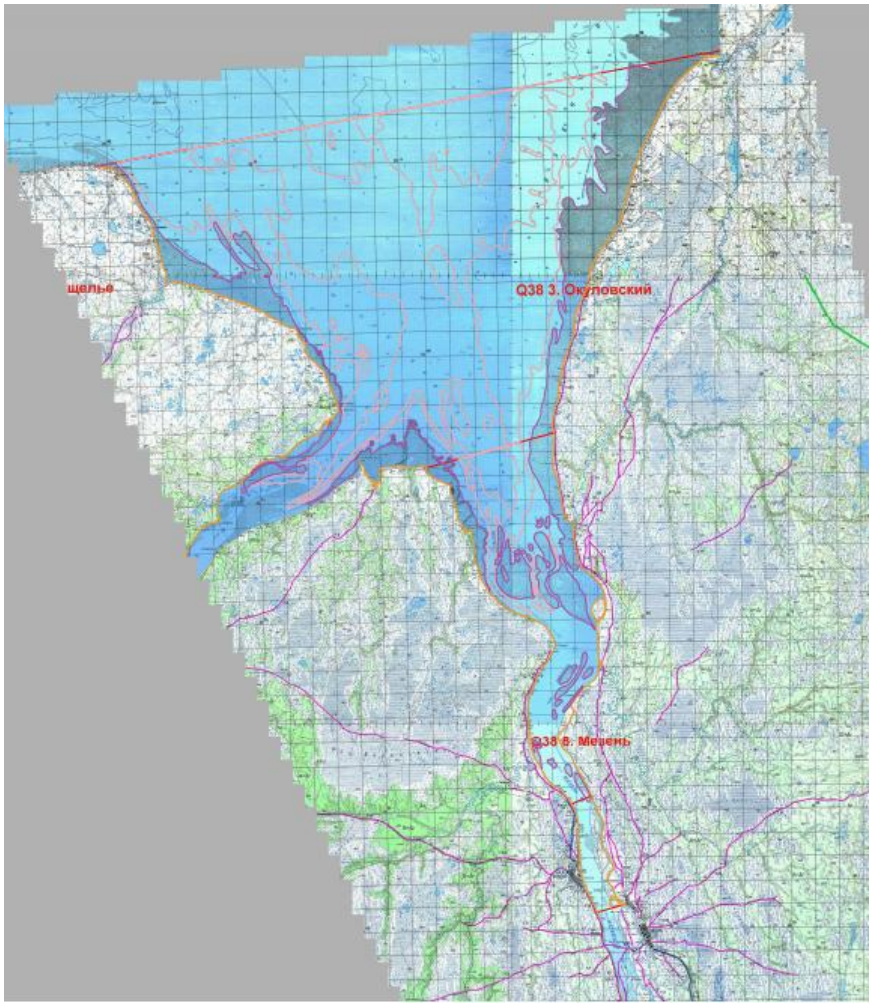


Рисунок 2.2— Устьевая область р. Мезень.

Дальность проникновения приливных волн зависит от величины прилива и от морфометрических характеристик реки (глубины реки, уклона и извилистости русла).

Граница распространения прилива вверх по течению реки в течение года не остается постоянной и перемещает ся под влиянием изменений величины прилива, сгонно-нагонных явлений, а также речного стока.

Значительное влияние на дальность распространения приливной волны оказывает ледяной покров.

В период прохождения половодья и паводков (увеличиваются расходы воды в реке и скорости течения) граница распространения прилива резко сдвигается в сторону моря.

На рисунке2.3 представлены факторы, определяющие уровенный режим устьевой области реки эстуарного типа, действующие со стороны моря и со стороны реки и меняющиеся во времени и в пространстве.

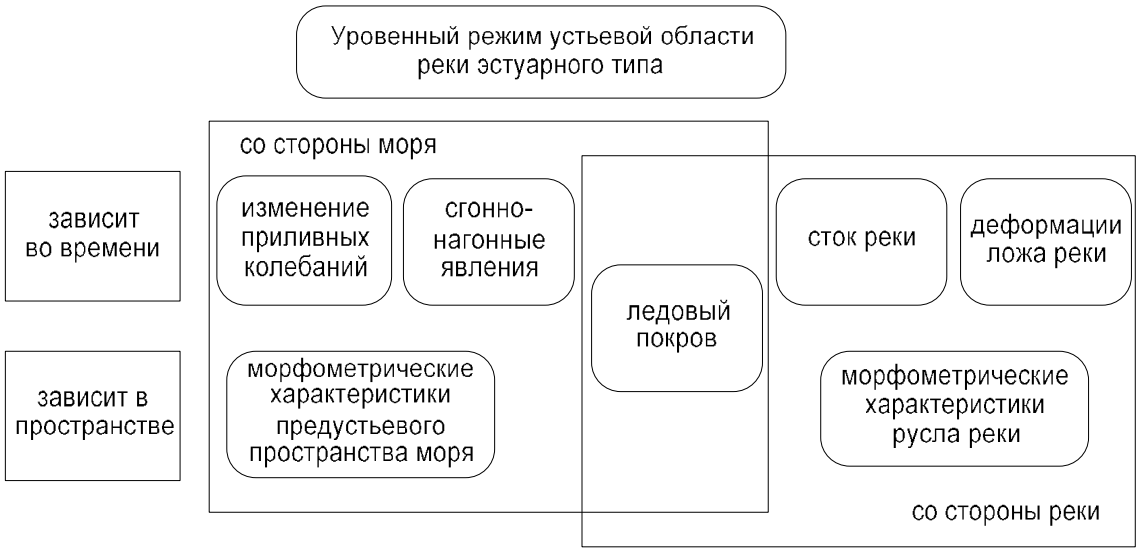


Рисунок 2.3— Факторы, определяющие уровенный режим устьевой области эстуарного типа.

Под влиянием мелководья, уклона дна и постоянного речного стока уменьшается скорость распространения приливной волны и создается значительная разность в скоростях движения ее гребня и подошвы. По мере распространения вверх по реке волна деформируется, расс тояние между гребнем и подошвой постепенно уменьшается, передний склон волны становится круче и время падения уровня значительно увеличивается по сравнению со временем роста.

В качестве примера этого явления можно привести наблюдения на р. Мезени (Таблица 2.1).

Таблица 2.1— Элементы прилива на р. Мезени

Пункт	Расстояние от устья, км	Продолжительность				Величина прилива, м	
		роста,		падения,		июль	февраль
		ч	мин	ч	мин		
Пыя	10	03	54	08	29	5,68	4,70
Каменка	26	02	54	09	34	3,56	0,68

Затухание прилива вверх по реке происходит неравномерно. Существенное влияние на колебания величин прилива оказывает изменение уклонов русла и площади поперечного сечения потока, особенно постепенное сужение эстуария, а также расположение боковых притоков, влияющих на общую мощность речного потока. С увеличением речного стока величина прилива уменьшается при общем подъеме уровня волновой поверхности. Однако взаимосвязь этих явлений чрезвычайно сложна и специфична для каждой реки.

Значительное влияние на приливные колебания уровня воды в эстуарии оказывают сгонно-нагонные явления. Взаимодействие между приливом и нагоном влияет также на высоту и время наступления пиков. Взаимодействие между приливными и сгонно-нагонными колебаниями в значительной мере зависит от соотношения их амплитуд.

Большое влияние на элементы прилива оказывает ледяной покров. В связи с потерей энергии приливной волны на трение, изгибание и другие деформации ледяного покрова значительно уменьшаются амплитуды прилива и скорости приливных течений. Уменьшается также, как правило, скорость распространения приливной волны. Это явление подтверждается данными наблюдений на р. Мезени (Таблица №2). При наблюдениях у Пыи были подвижные льды, у Каменки – неподвижные.

Соответственно, в пределах устьевой области реки эстуарного типа приходится встречаться со сложным уровенным режимом, обусловленным одновременным воздействием реки и прилегающей к ней части моря, что

создает ряд особенностей при организации и ведении системы мониторинга в этих районах.

Важно отметить, что моделирование данных процессов является весьма сложной задачей и требует комплексного подхода для решения. По сравнению с расчетами в открытом море, или расчета паводочной волны тут приходится производить стыковку двух этих моделей. Приходится учитывать деформацию приливной волны на мелководье, адвекцию скорости, нелинейный характер трения, а также эффекты, возникающие при взаимодействии приливной волны и стационарного речного потока. Это усложняет уравнения, описывающие явления, и соответствующие расчеты. На практике данные расчеты весьма актуальны при проектировании и строительстве приливных гидроэлектростанций, в устье исследуемой реки планировалась постройка данного объекта энергетики, однако все было заморожено из-за нехватки средств.

3 Подготовка гидрографической модели устьевого участка р.Мезень

В случае с устьевым участком р.Мезень выбрано два варианта подготовки гидрографической основы для будущей модели.

3.1 Оцифровка карт Госгисцентра и Генштаба масштаба 1 км с нанесенными изобатами

Для оцифровки использована программа Civil 3D(Рисунки 3.1-3.2).

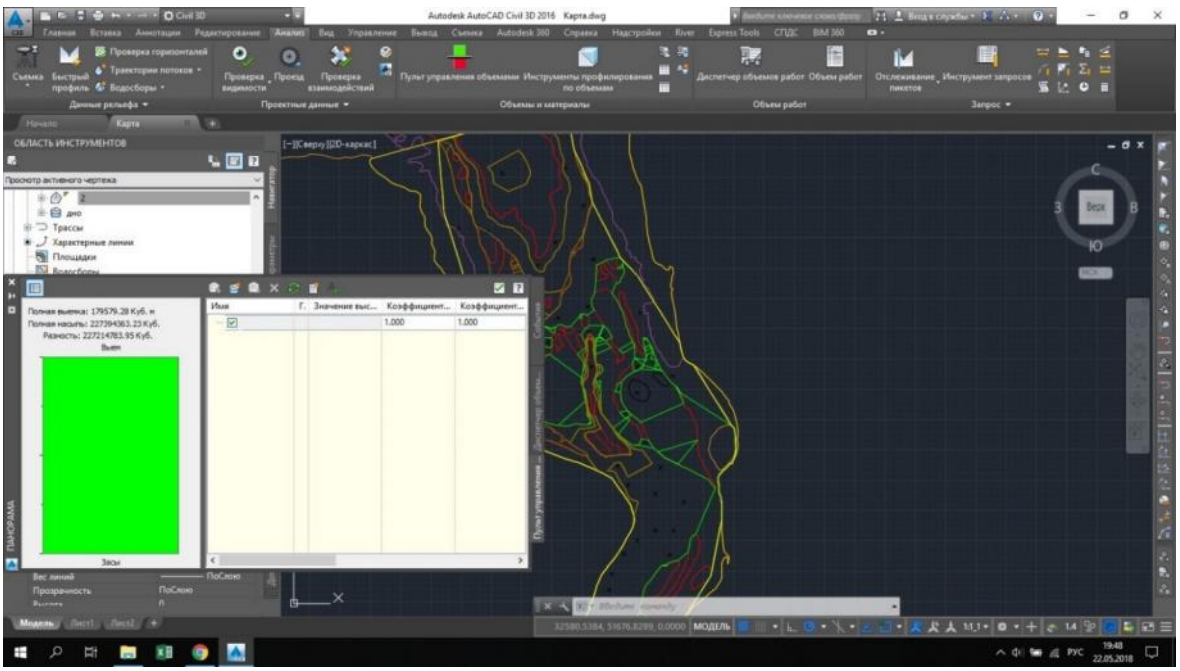


Рисунок 3.1 – Оцифровка изобат.

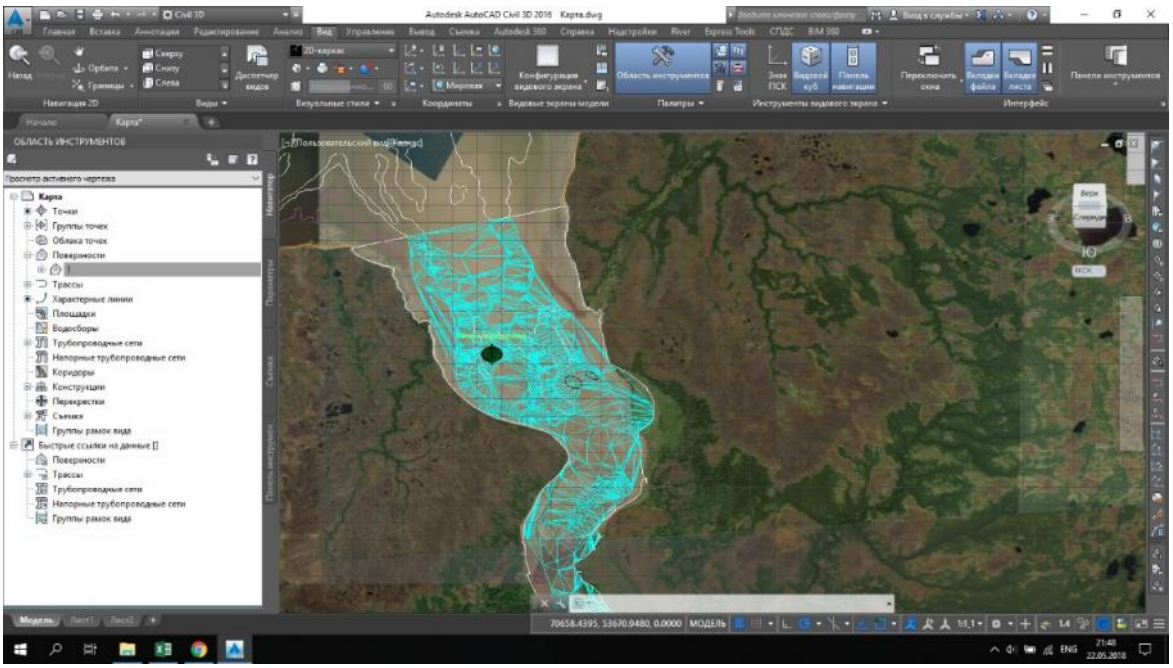


Рисунок 3.2 – Пространственная модель устьевого участка р.Мезень.

Оцифровка изобат позволяет представить устье в виде объемной фигуры, и при помощи Civil3D можно вычислять объемы поверхностей. По данным результатам построена батиграфическая кривая для устьевой области р.Мезень (Рисунок 3.3).

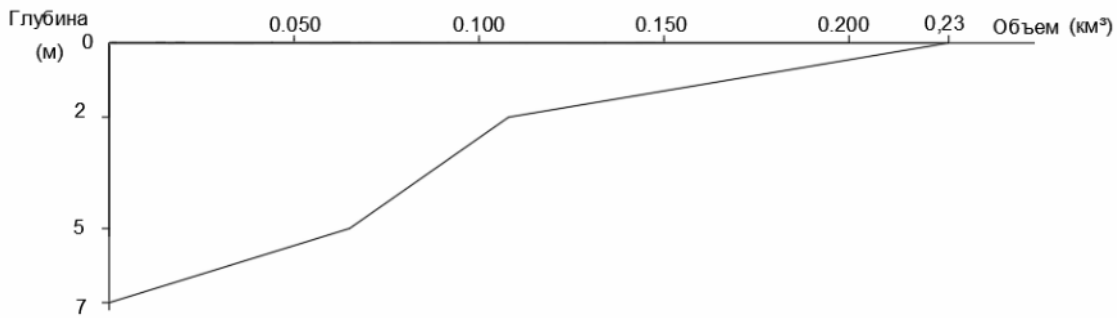


Рисунок 3.3 – Батиграфическая кривая устьевого участка р.Мезень.

Программа Civil 3D обладает возможностью экспо ртировать данные в программный комплекс HEC-RAS (Рисунок 3.4). Для экспортаопределена осевая линия потока как трасса. Создана группа осей сечений с пикетами в

требуемых местоположениях осевой линии потока. Построены полилинии, служащие представлением левого и правого берегов потока ("бровок").

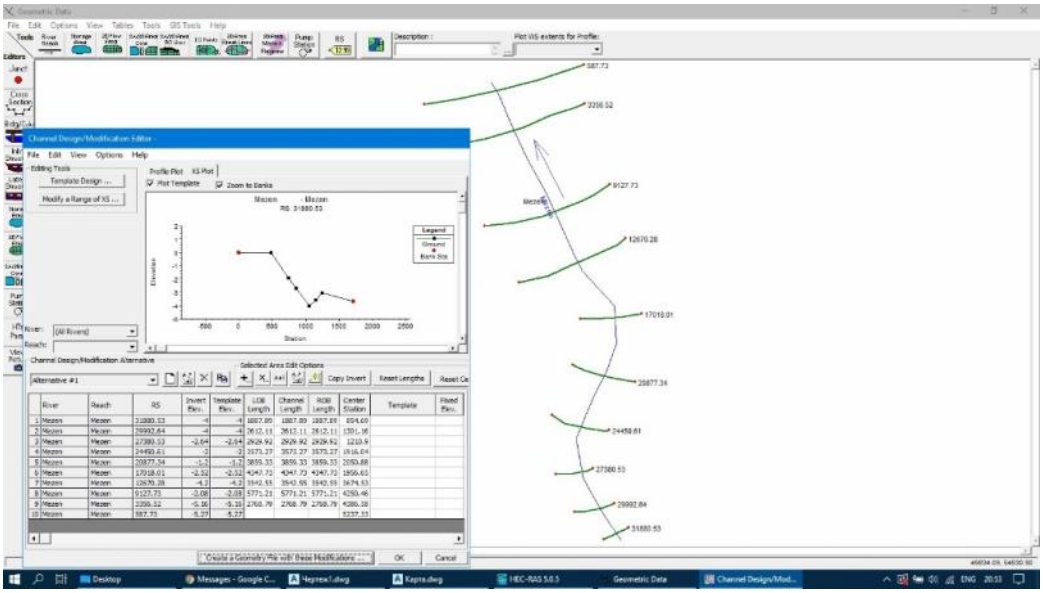


Рисунок 3.4–Экспорт данных в программный комплекс HEC-RAS.

3.2 Подготовка гидрографической основы при помощи радарных спутниковых снимков

Выделяют два направления получения пространственной информации о земной поверхности из космоса: съемка в видимом и инфракрасном диапазонах длин электромагнитных волн (оптико-электронные системы) и съемка в сантиметровом радиодиапазоне (радарные системы). Радарные данные используются для решения широкого круга задач. Они, во-первых, могут дать дополнительную информацию о состоянии поверхности и объектов наряду с данными оптического диапазона, во-вторых, радиолокационные данные могут служить источником уникальной информации, которую можно получить либо только по радарным данным, либо по наземным измерениям. совместная обработка оптических и радиолокационных данных. Используя снимки, полученные в оптическом диапазоне и радиолокационныеданные, можно получать композитные

изображения, которые содержат в себе информацию о подстилающей поверхности полученную в двух зонах спектра.

Для решения поставленной задачи были использованы радарные снимки с спутника Sentinel 1A. Данный спутник был запущен в 2014 году . Основной задачей данного спутника является отслеживание окружающей среды, обнаружения разливов нефти, картирования морского льда, мониторинга движения на поверхности земли и картирования изменений в способе использования земли.

Данный спутник снимает разных режимах, мною был выбран InterferometricWideSwath т.к из всех снимков, находящихся в открытом доступе, данные снимки обладают оптимальными параметрами точности : ширина пролета – 250 км, разрешение без обработки 5x20 метров, поляризация HH+HV.

В качестве источника снимков использовался проект Nasa – Earthdata (Рисунок 3.5).

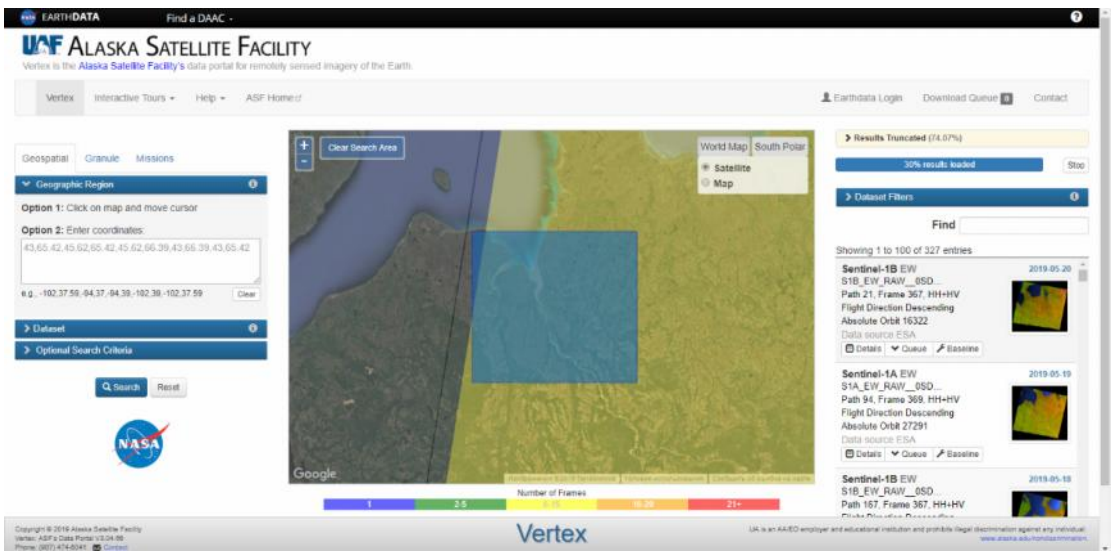


Рисунок 3.5 – Подбор спутникового снимка подходящего разрешения.

4 Работа с программным комплексом HEC-RAS

4.1 Общие сведения о программном комплексе HEC-RAS

Программный комплекс HEC-RAS(HydrologicEngineeringCenter-RiverAnalysisSystem), разработан в Гидрологическом инженерном центре Корпуса гражданских инженеров армии США(U.S. ArmyCorpsofEngineers, 1995). Программный комплекс реализует одномерный подход к гидравлическому моделированию речных потоков, работает в среде Windows и включает в себя графический интерфейс, компоненты гидравлического анализа, хранение и управление данными, графические и отчётные средства. В версию программы HEC-RAS 5.0.5 входит четыре расчётных модуля:

1) Анализ одномерного потока.
2) Моделирование нестационарного потока.
3) Расчеты транспорта наносов в деформируемых руслах.
4) Анализ качества воды.

Данная программа находит применение в очень многих областях гидрологии и сопутствующих ей строительных изысканий. Таких как: моделирование водосборов, закрытых водосборов, моделирование плотин, водопропускных сооружений. В пакет анализа качества воды входят – анализ температуры, количества растворенного кислорода, углекислого газа, ортофосфата, органического фосфора, нитрата амоиния и других химических элементов.

Основной задачей программы является расчет уровней воды в исследуемых зонах. Осуществляется это с помощью одномерного уравнения сохранения энергии (4.1) (Рисунок 4.1-4.2):

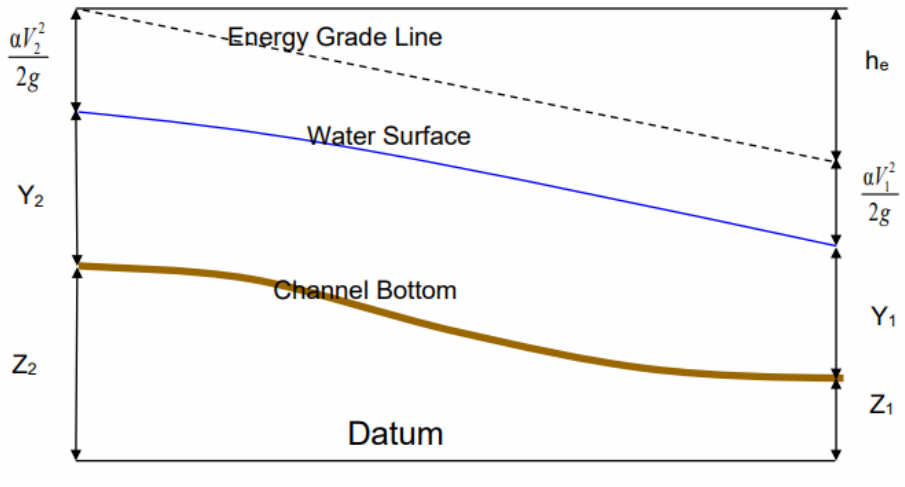


Рисунок 4.1 визуализация используемого уравнения.

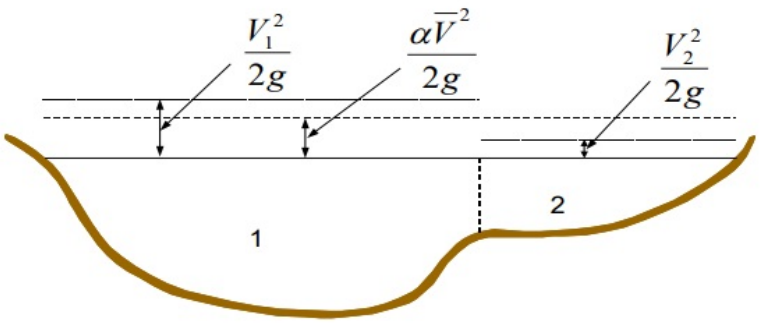


Рисунок 4.2 – визуализация используемого уравнения.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (4.1)$$

Z_2, Z_1-уровень воды в поперечных сечениях.

V_2, V_1- средние скорости.

a_2, a_1-весовые коэффициенты.

g - ускорение свободного падения.

h_e-потери энергии.

Потери энергии состоят из потерь на трение и сжатие (расширение) между секциями в поперечном сечении.

Главным принципом расчета является деление потока на составные части, русло поймуи коренной берег. Задавая для каждой из секций коэффициент Маннинга можно получать значения скорости и расхода воды в секциях и на их границах (Рисунок 4.3).

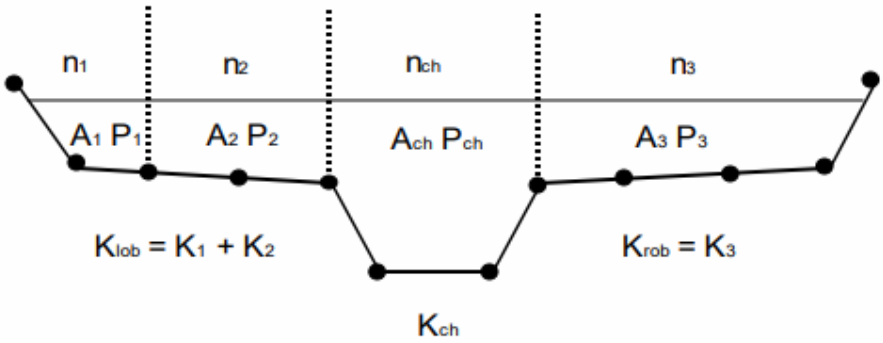


Рисунок 4.3 – визуализация метода расчета HEC-RAS.

$$Q = KS_f^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{\frac{2}{3}} \quad (4.3)$$

K –модуль расчета секции.

n –коэффициент Маннинга для секции.

A –площадь секции.

R - гидравлический радиус.

S_f - уклон между секциями.

4.2 Этапы работы в программе HEC-RAS

Первым этапом после загрузки спутникового снимка, является его первичная обработка - обрезка интересующего нас участка. В данном случае это область от Мезенской губы до района впадения р.Пезы в р.Мезень. Для данной обработки был использован ARCGIS.

Дальнейшей задачей является портирование радарного снимка в среду HEC-RAS. HEC-RASработает с собственным типом цифровых данных о рельефе – HDF. Для конвертирования TIFF файлов используется RAS-MAPPER. На выходе мы получаем полноценную карту высот, на которую

дополнительно можем совместить с обычными спутниковыми снимками для уточнения ЦМР (Рисунок 4.4).

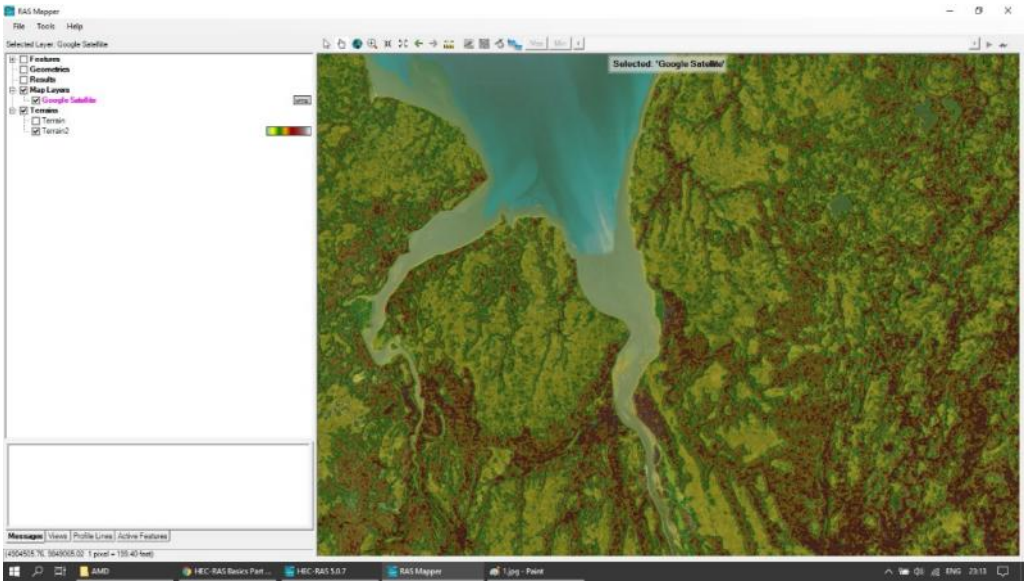


Рисунок 4.4 – Совмещение радарного и обычного спутникового снимка в RAS-Mapper.

Следующим этапом становится добавление геометрических объектов. В данном случае это река. Выбирая «River» во вкладке «Geometry» при помощи полилинииобозначается основное русло (Рисунок 19).

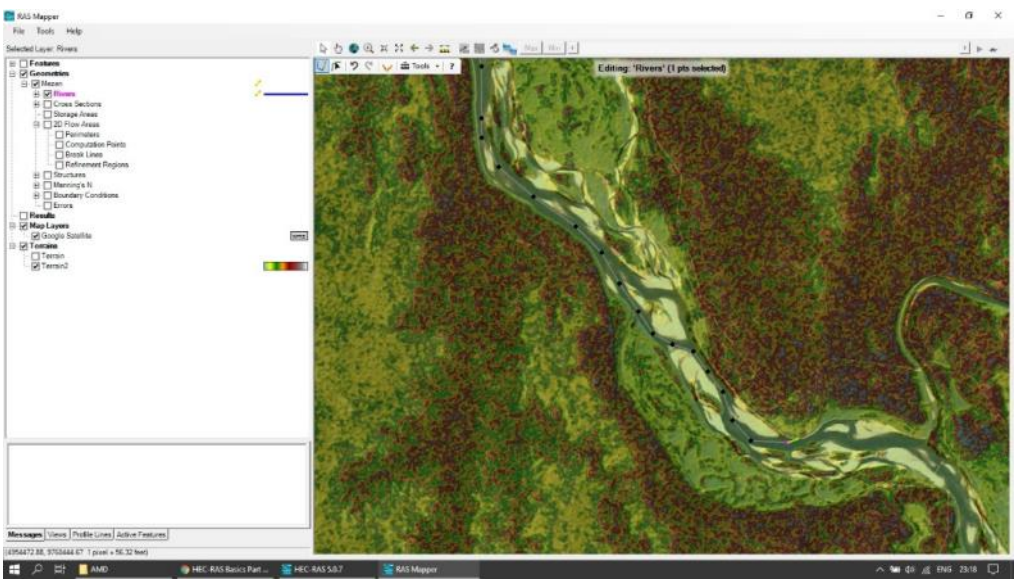


Рисунок 4.5 – Построение осевой линии потока р.Мезень

Далее наносятся границы мертвых зон (красная линия) и границы поймы (голубая линия). По длине всего исследуемого участка наносятся поперечные профиля через каждые 5 км (Рисунок 4.6).

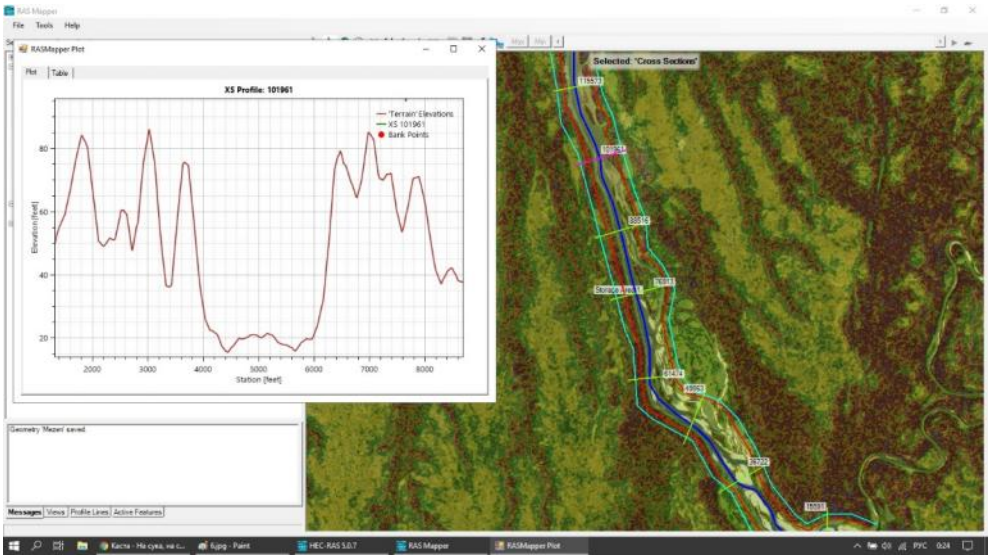


Рисунок 4.6 – Нанесение поперечников на радарный снимок.

Для каждого из профилей определяются пара метры, учитывающие потерю на сопротивление, такие как коэффициенты шероховатости Маннинга, коэффициенты потери энергии на сжатие и расширение потока в связи с изменением морфометрии русла.

В результате всех вышеперечисленных действий, получаем геометрическую модель исследуемого участка (Рисунок 4.7).

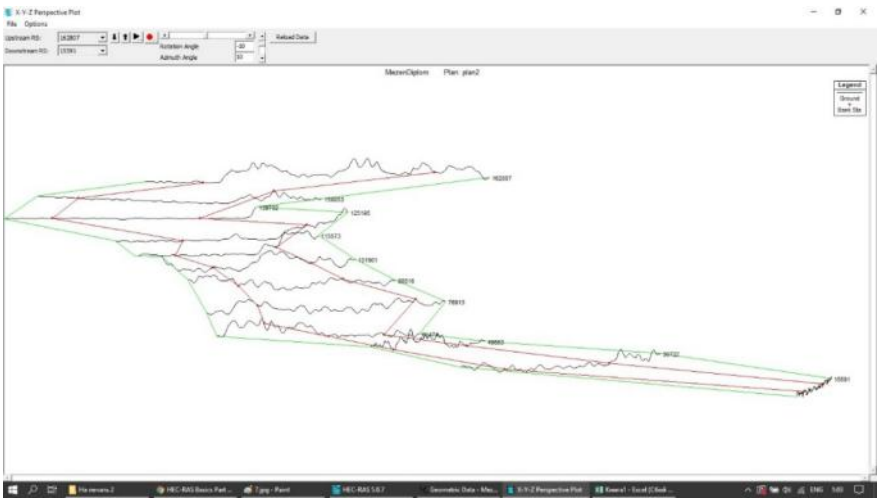
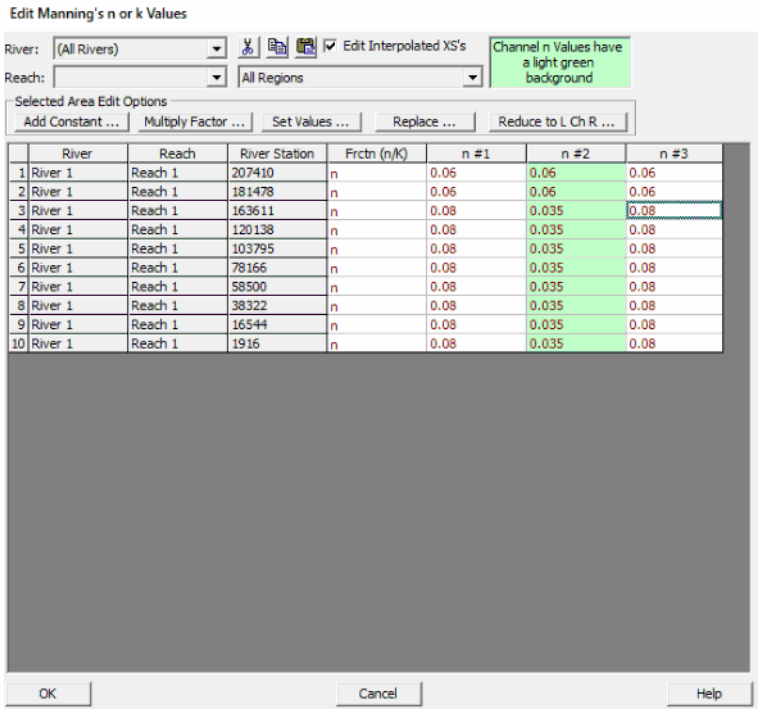


Рисунок 4.7- пространственная геометрическая модель устьевого участка реки.

Для каждого из профилей задается коэффициент Маннинга для русла и для пойменной части. В связи с недостатком данных для русла он принимается равным 0.035, для пойменной части 0.05. (Рисунок 4.8).



	River	Reach	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	River 1	Reach 1	207410	n	0.06	0.06	0.06
2	River 1	Reach 1	181478	n	0.06	0.06	0.06
3	River 1	Reach 1	163611	n	0.08	0.035	0.08
4	River 1	Reach 1	120138	n	0.08	0.035	0.08
5	River 1	Reach 1	103795	n	0.08	0.035	0.08
6	River 1	Reach 1	78166	n	0.08	0.035	0.08
7	River 1	Reach 1	58500	n	0.08	0.035	0.08
8	River 1	Reach 1	38322	n	0.08	0.035	0.08
9	River 1	Reach 1	16544	n	0.08	0.035	0.08
10	River 1	Reach 1	1916	n	0.08	0.035	0.08

Рисунок 4.8 – Таблица с значениями коэффициента Маннинга для профилей устьевого участка р.Мезень.

После построения пространственной модели можно моделировать сток. Используя инструмент задания гидрографа через определенный интервал времени. В качестве эксперимента, задангидрограф при котором расход в течении 12 часов изменился с 500 $м^3$/сдо 3000$м^3$/с (Рисунок 4.9 – 4.10).

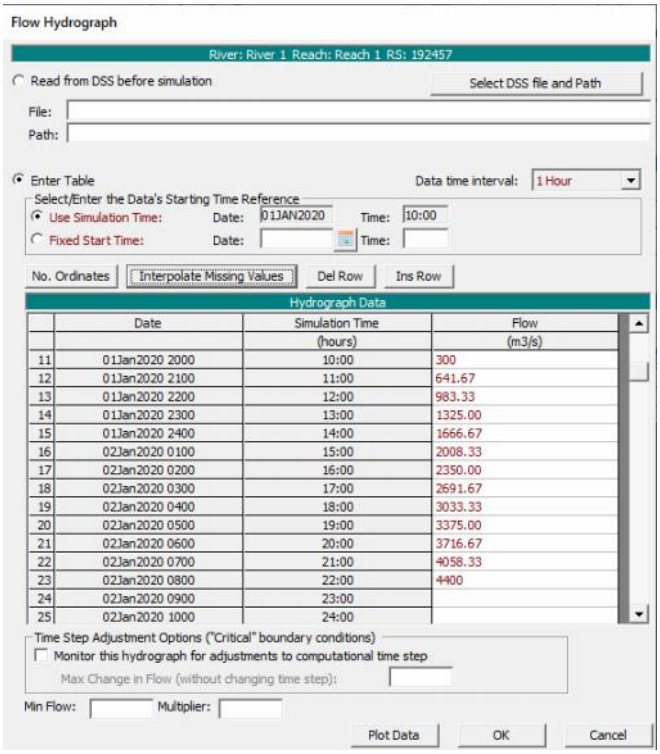


Рисунок 4.9 – Задание гидрографа для устьевого участка р.Мезень.

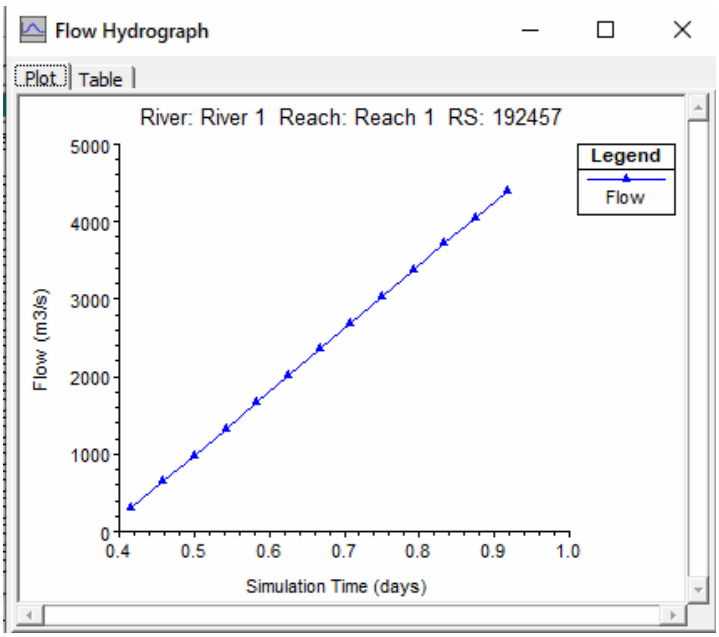


Рисунок 4.10 – Визуализация заданного гидрографа.

В результате получены расчет и визуализация заданной паводочной волны на исследуемой модели устья, при расходе 600 м³/с (Рисунок 4.11), 2000 м³/с (Рисунок 4.12) и 4400 м³/с (Рисунок 4.13).

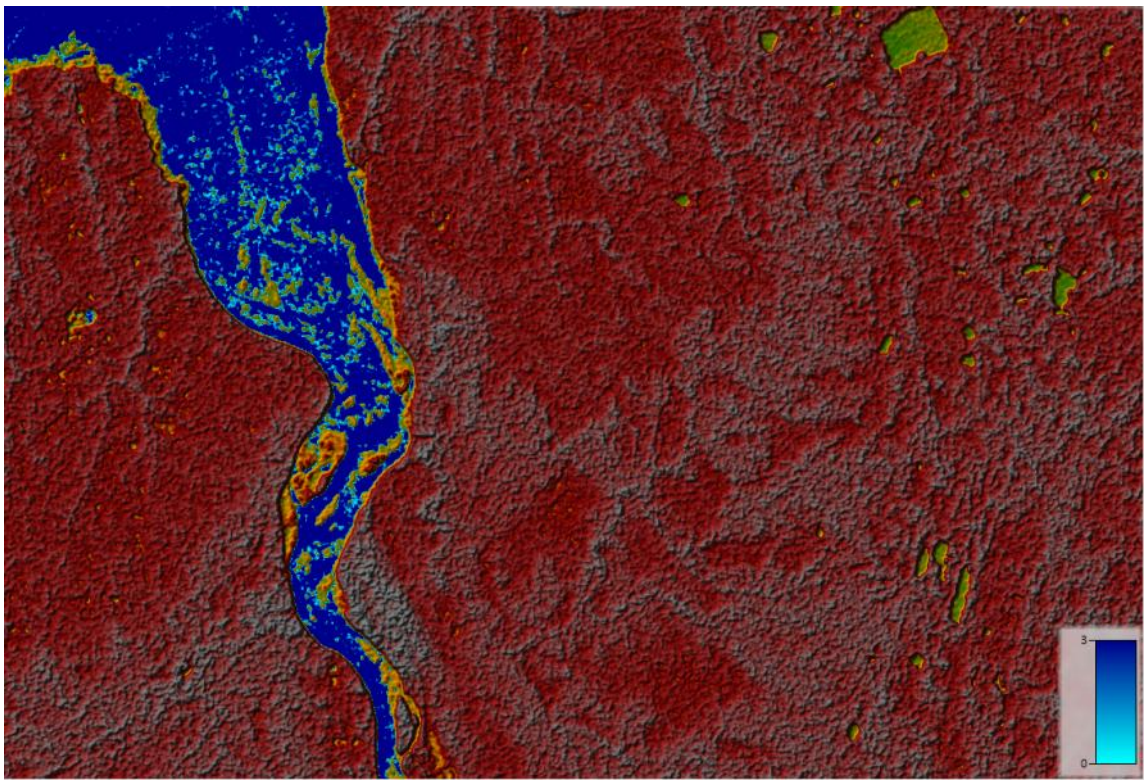


Рисунок 4.11 - Визуализация расхода 600 м³/с в устьевой части р.Мезень.

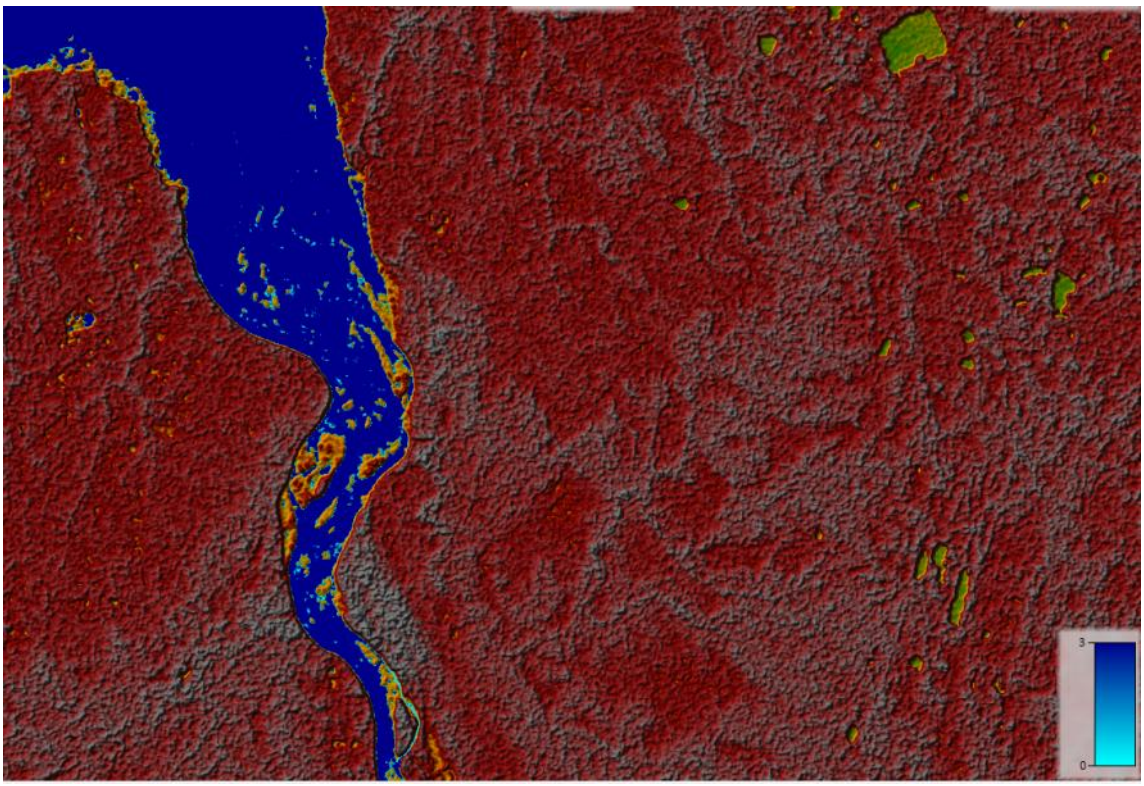


Рисунок 4.12 – Визуализация расхода 2000м³/св устьевой части р.Мезень.

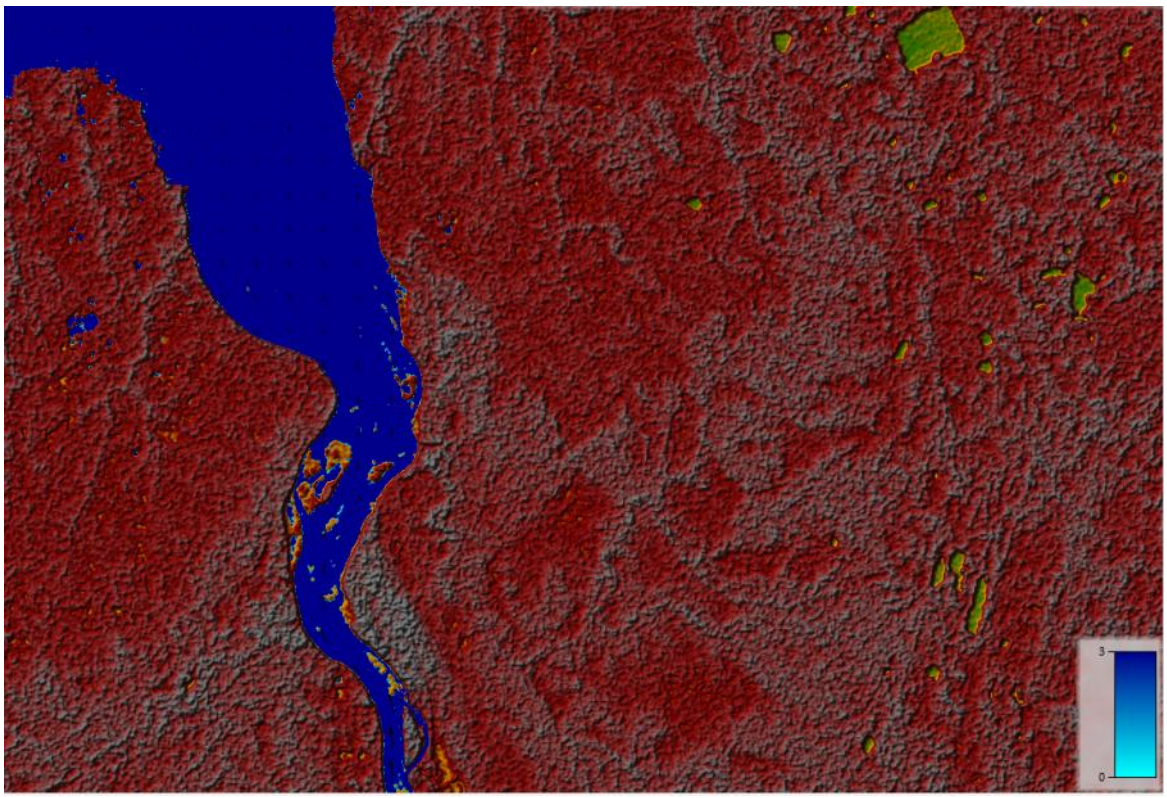


Рисунок 4.13Визуализация расхода 4400 м³/с в устьевой части р.Мезень.

Важно отметить, что помимо карты заполнения в RAS-Mapperреализована визуализация распределения скоростей (Рисунок 4.14).

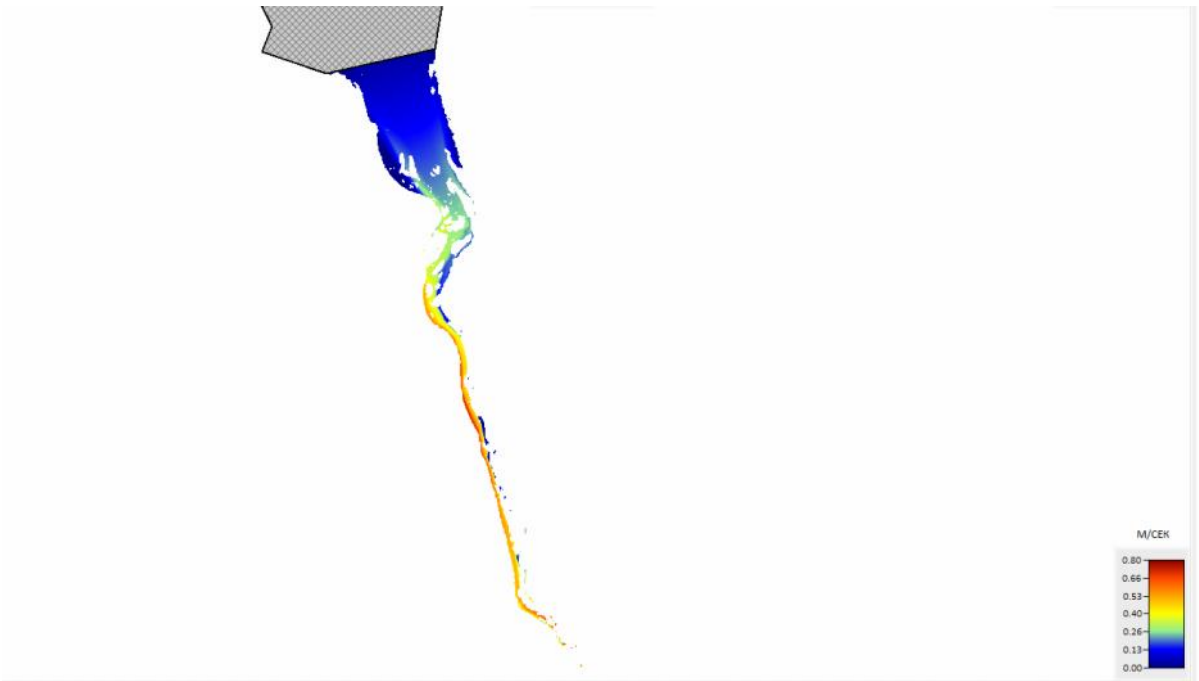


Рисунок 4.14 – Распределение скоростей на устьевом участке р.Мезень при расходе 2000м³/с.

Исходя из данной модели самые большие скорости на данном участке реки наблюдались в районе п.Каменка и достигали 0,8 м/с (Рисунок 4.15).

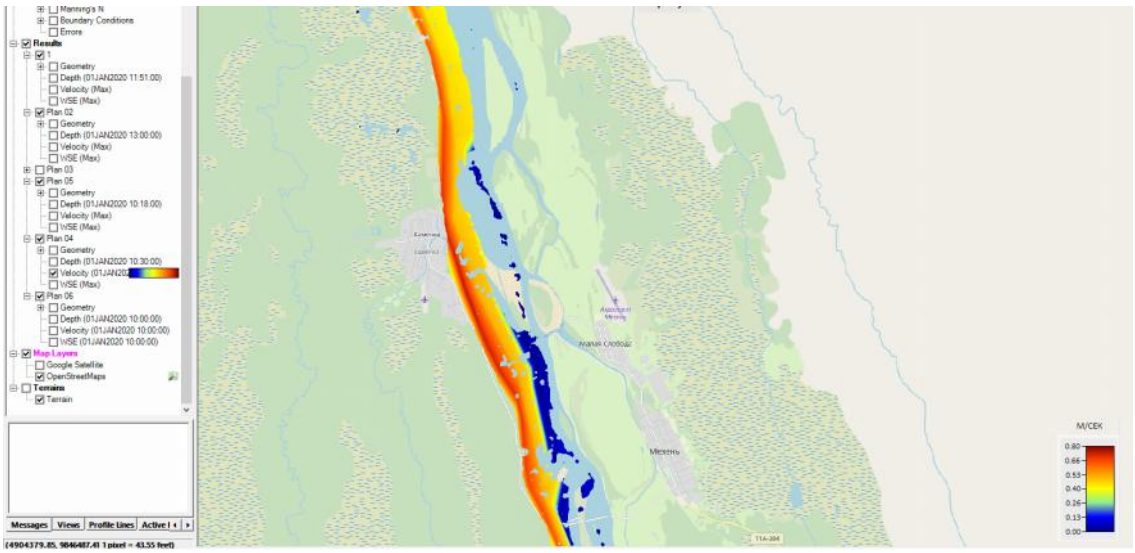


Рисунок 4.15 – Скорости течения в районе п.Каменка при расходе 2000 м ³/с.

Для каждого из профилей построены зависимости *f(H)* (площади от уровня воды) (рис.4.16 – 4.17).

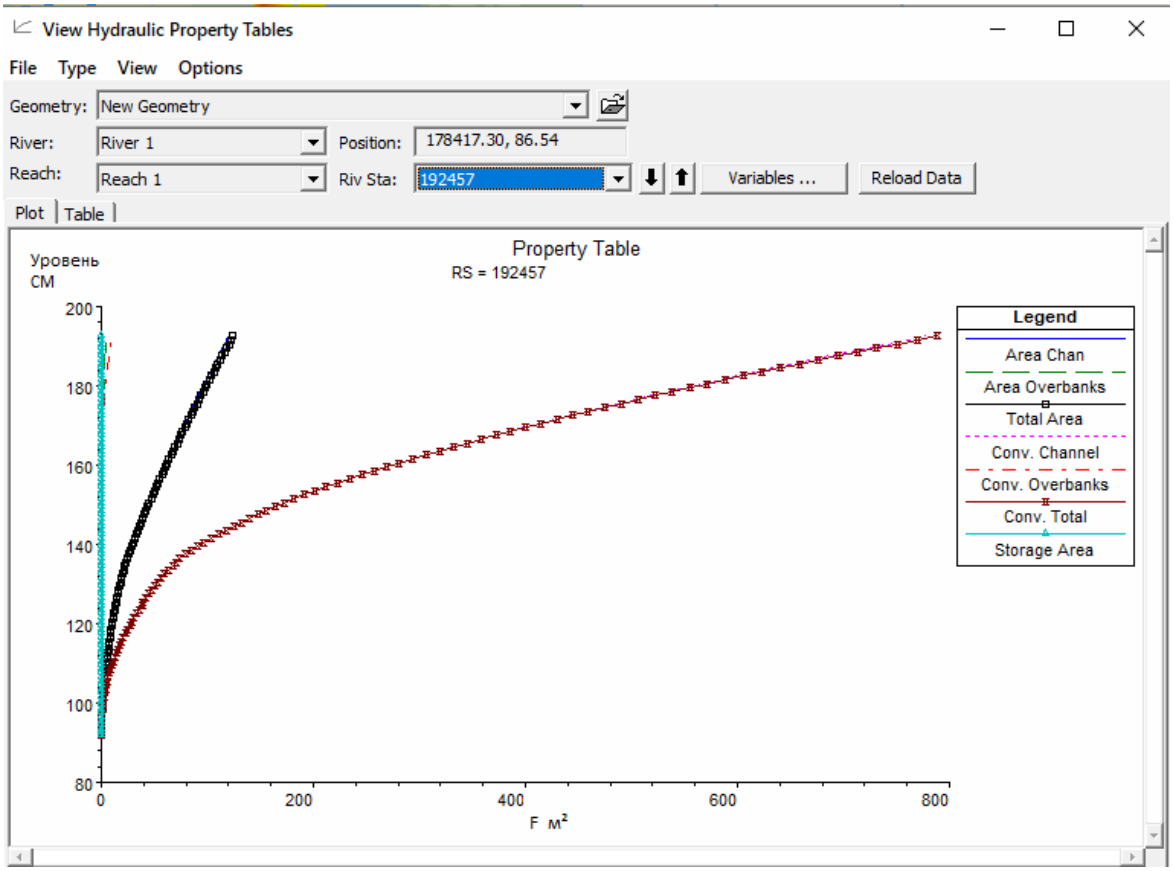


Рисунок 4.16–Зависимости *f(H)* для профиля в 5 км вниз по течению, от впадения реки Пезы, в районе д.Дорогорское.

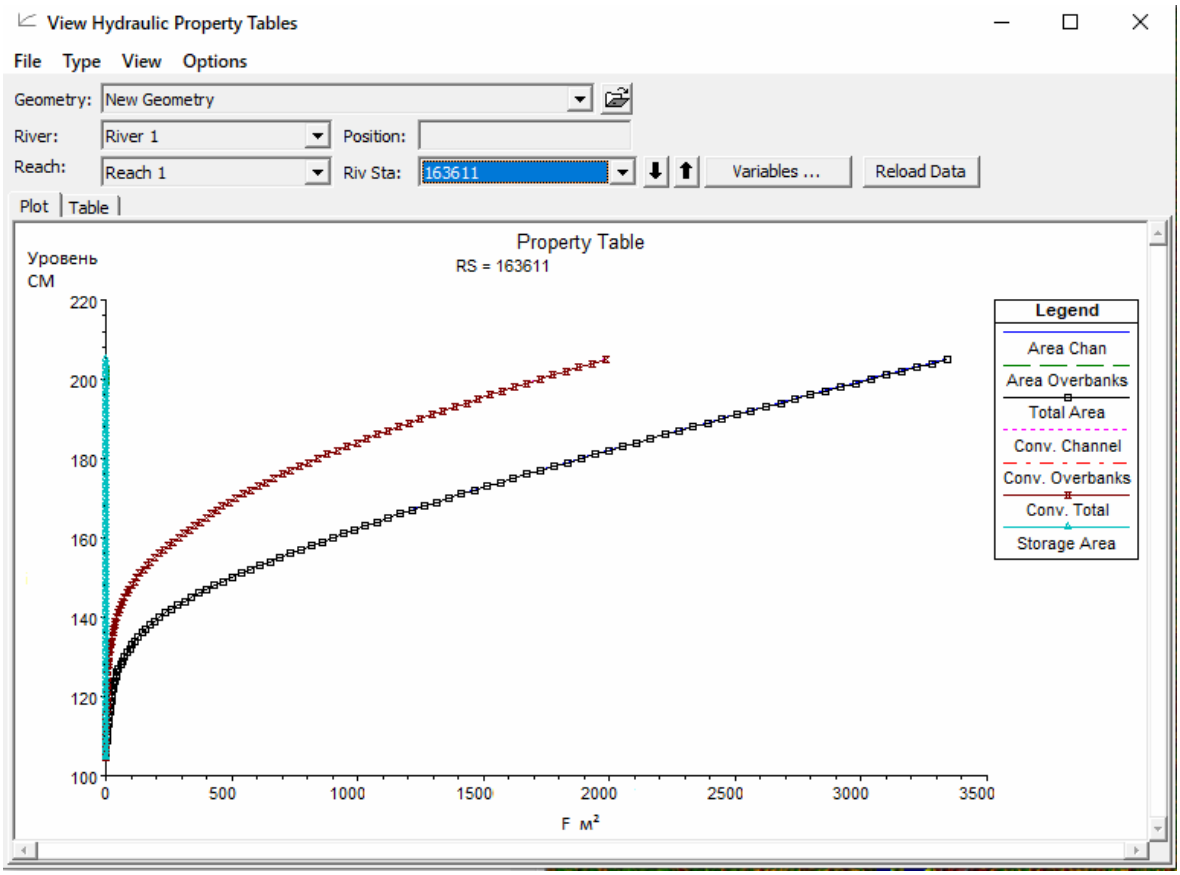


Рисунок 4.17–Зависимости *f(H)* для профиля в районе впадения р.Пыя.

4.3 Моделирование приливной зоны.

Исходя из того, что на устьевую систему влияют многие факторы, такие как приливно-отливные колебания, сгонно-нагонные колебания, интрузия морских водлогично предположить, что с одномерная модель не подходит для описания устьевой области.

В программном комплексе HEC-RASесть модуль отвечающий за моделирование двумерный модели «2 DFlowarea».

В основе метода лежит уравнения Навье-Стокса описывают движение жидкостей в трех измерениях. Один упрощенный набор уравненийявляется уравнением мелкой воды (SW). Несжимаемый поток, равн омерная плотность и гидростатическое давления предполагаются статическими и усредняются по Рейнольдсу, так что турбулентное движениеаппроксимируется с использованием вихревой вязкости. Также предполагается, что вертикальная

шкала длинменьше, чем горизонтал ьная шкала. Как следствие, вертикальная скорость мала идавление является гидростатическим, что приводит к дифференциальной форме уравнений мелкой воды.В некоторых мелких потоках член баротропного градиента давления (силы тяжести) и нижнее слои трения являются доминирующими членами в уравнениях импульса , адвекции.Вязкие условия могут быть проигнорированы. Уравнение импульса становится двумерным форма приближения диффузионной волны. Объединение этого уравнения с сохранением массыдает модель с одним уравнением, известную как приближение диффузной волны на мелководье(DSW).

Кроме того, для сокращения времени вычислений,использ уется батиметрический подход с использованием подсеток (Рисунок 4.18). Идея этого подхода состоит в том, чтобы использовать относительно гру бую вычислительную сетку и более тонкую с масштабированной, информацией лежащей в основе гидрографии и топографии. Мелкие детали сетки определяются какпараметры, представляющие несколько интегралов по объемам и граням. В результатеТранспортировка жидкой массы учитывает мелкую топографию внутри каждой отдельной ячейки. Поскольку эта идея относится только к уравнению массы, его можно использовать независимо от версииуравнение импульса. В приведенных ниже разделах уравнения батиметрии для подсетей выводятся вконтекст обоих; полные уравнения мелкой воды (SW) и диффузионные волны (DSW).

С учетом что поток несжимаемый ,то уравнение неразрывности принимает вид (4.1):

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}+q=0 \quad (4.4)$$

t – время.

u, v – компоненты скорости в направлениях x,y.

q –расход источника.

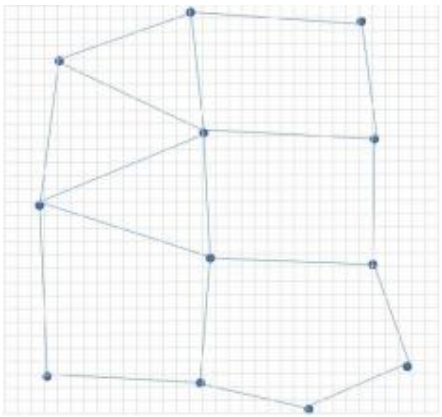


Рисунок 4.18 – Вычислительная сетка HEC-RASнесущая в себе информацию гидравлическом радиусе, объеме иплощади поперечного сечения.

На практике данная задача выполняется с помощью выделения 2Dобласти. В случае с устьевой областью проведение границы взаимодействия морской и речной воды для модели является достаточно спорным моментом. В качестве эксперимента данная линия была проведена по границе предустьевого взморья (Рисунок 4.19).

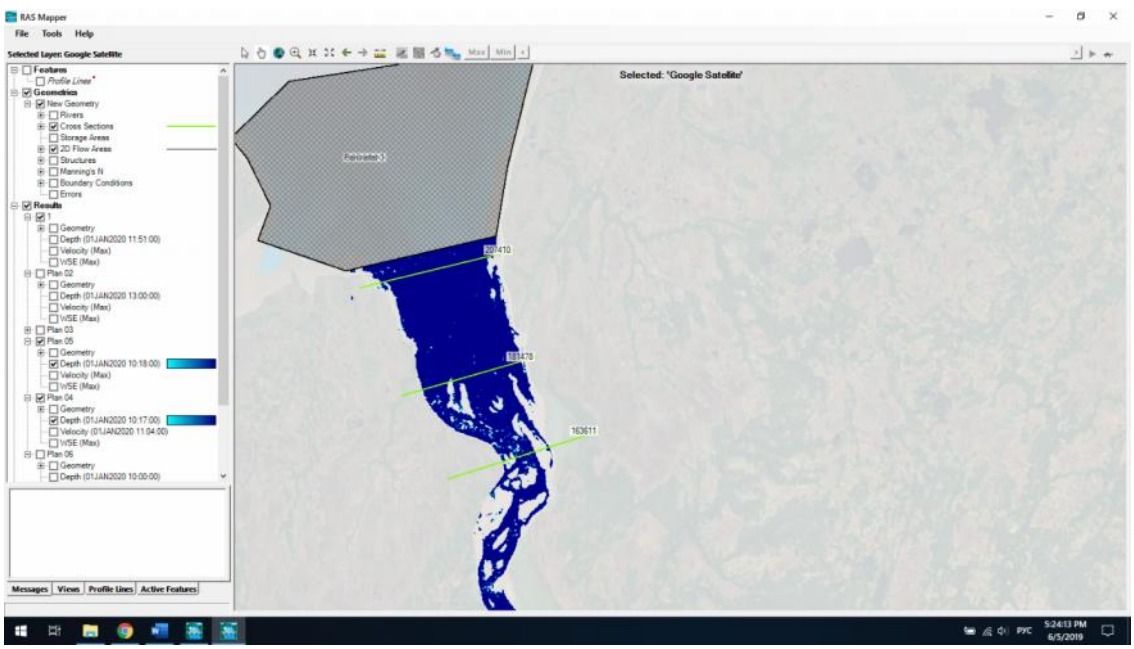


Рисунок – 4.19 Выделение зоны с двумерным взаимодействием.

В связи с тем , что программный комплекс HEC-RASмалоизучен, и достаточно сложно подобрать нужные параметры для морской части устья , которые бы учитывали ветер соленость приливы и отливы. Но задав некоторые параметры, было получено условное взаимодействие реки и моря (Рисунок 4.20).

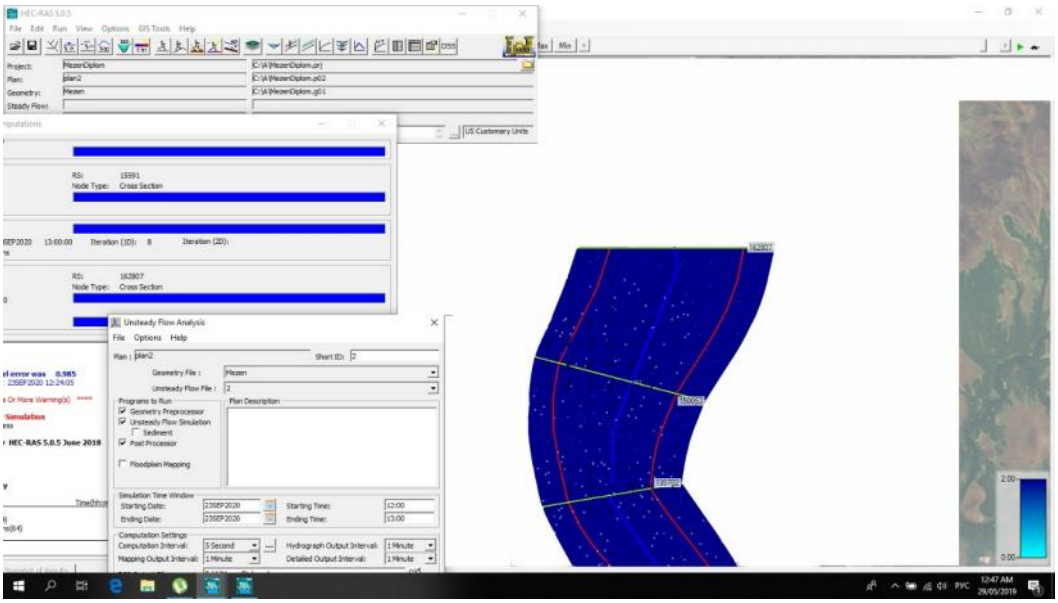


Рисунок 4.20 – Взаимодействие двух потоков в эстуарии р.Мезень.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе решения поставленной задачи получены алгоритмы поиска и использования пространственной информации для построения моделей устьевых областей. По полученным данным построена гидрографическая модель устьевой области р. Мезень, рассчитана батиграфическая кривая для эстуария, построена картараспределения скоростей, построены кривые зависимости площади живого сечения от уровня воды. На основе данной модели были изучены возможности адаптации программы HEC-RAS для устьевых областей.

Главным выводом проделанной работы является то, что при использовании радарных снимков высокого разрешения можно достичь высокой точности измерений, следовательно создать модель способную давать хорошие прогнозы. Программа HEC-RAS обладает очень большим потенциалом и может использоваться для решения многих задач, в том числе такого сложного процесса, как взаимодействия реки и моря.

Подводя итог проведенной работы, важно сказать о том, что сфера компьютерного моделирования активно развивается и с каждым годом может давать более точные и быстрые прогнозы. Использование радарных снимков так же становится все более оправданным, так как их погрешность по высоте у платных ресурсов достигает (0,5 метра). Для некоторых видов изысканий такие погрешности неприемлемы, однако при работе с большими объектами, например водосборами и тд, данные погрешности можно считать незначительными. Покупка радарного снимка в некоторых случае экономически выгодней натурных изысканий. Исходя из всего вышеперечисленного главным результатом проделанной работы стал готовый алгоритм построения гидрологической модели устьевой области по спутниковым данным, точность которой будет прямо зависеть от разрешения радарного снимка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения.
2. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек, 1998.
3. HEC-RAS 5.0 Reference Manual, 2012.
4. HEC-RAS 5.0 2D Modeling Users Manual, 2012.
5. Иванов В.В., Третьяков М.В. Проблемы восстановления и развития системы гидрометеорологических наблюдений в устьевых областях рек Арктической зоны как основы государственного мониторинга этих поверхностных водных объектов // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 4.
6. Иванов В.В. Методика оценки запасов пресных вод в устьевых областях рек Арктики с закры-тыми устьевыми взморьями // Проблемы Арктики и Антарктики. 1991.
7. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящееи будущее. – М.: ГЕОС, 1997
8. Михайлов В.Н., Горин С.Л., Михайлова М.В. Новый подход к определениюи типизации эстуариев // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2009.
9. Медведев В.С. Вопросы динамики прибрежной зоны Мезенского залива. Белого моря в связи с проектированием приливных электростанций. Геоморфология и литология береговой зоны, М.: Наука, 1971.
10. Демиденко Н.А. Гидрологический режим Мезенского залива и эстуариев Мезени и Кулоя. Монография Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера.М.: Научный мир, 2012.