



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Гидрологический режим**
устьевой области р. Хатанга

Исполнитель Головатских Максим Александрович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физ.-мат. наук
(ученая степень, ученое звание)

Саноцкая Надежда Александровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«15» 06 2020г.

Санкт-Петербург
2020

Содержание

Введение

Гидрологический режим, или режим вод, представляет собой совокупность характерных особенностей изменения состояния водных объектов во времени.

Гидрологический режим реки изменяется со временем скорость течения рек, а также уровни и объемы воды в реках, озерах, водохранилищах и болотах. Гидрологический режим тесно связан с сезонными изменениями климата. В регионах с тёплым климатом на гидрологический режим влияют главным образом атмосферные осадки и испарение; в регионах с холодным или умеренным климатом температура воздуха является ведущим фактором.

Гидрологический режим рек проявляется в суточных, десятидневных, месячных, сезонных и многолетних колебаниях. Он состоит из ряда характерных периодов (фаз), изменяющихся в зависимости от сезонных изменений условий питания рек. Эти фазы известны как: половодье, паводки, межень, ледостав, ледоход. Реки питаются неравномерно в течение года из-за различного количества осадков и неравномерного таяния снега и льда и поступления их воды в реки. Наблюдаемые колебания уровня воды вызваны главным образом изменением скорости течения и воздействием ветра, льда и хозяйственной деятельности человека.

В выпускной квалификационной работе рассматриваются возможности изучения гидрологического режима рек с помощью современных геоинформационных технологий на примере реки Хатанги.

Целью данной работы является анализ и оценка возможностей современных средств компьютерного моделирования и ГИС-технологий для получения общего представления процессах, происходящих в устьевой области исследуемой р. Хатанга и ее устьевой области, как недостаточно изученной реки АЗРФ (Арктической зоны Российской Федерации).

1 Общее физико-географическое описание исследуемого района

Бассейн реки Хатанги находится в северо-восточной Сибири, на территории Красноярского края, в юго-восточной части полуострова Таймыр. Онобразован слиянием двух рек — Хета и Котуй. Река протекает по лесотундре Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района.

Течёт Хатанга основным руслом и множеством протоков, расширяется меандрами по равнинной тундре, окружена участками старых русел старицами. Справа в нее впадают такие же извилистые, протекающие по тундре с множеством меандров реки Блудная, название оправдано, в низовьях Нижняя, и устьевое расширение принимает реку Попигай. Левыми притоками являются Малая Балахня и Новая.

Длина Хатанги составляет 1.6 тыс. км, площадь бассейна — 364 тыс. км². Равнинная река протекает по Северо-Сибирской низменности в широкой долине, разбиваясь на рукава, в русле расположено большое количество островов. Река впадает в Хатангский залив моря Лаптевых. В бассейне Хатанги находится около 112 тыс. озёр общей площадью 11.6 тыс. км², до настоящего времени бассейн реки еще мало исследован.

В бассейне реки также находятся месторождения нефти и газа, каменного угля. Развит промышленный лов рыбы (ряпушки, омуля, муксуна, нельмы, тайменя, гольца) и оленеводство. Река судоходна до узла слияния Хеты и Котуя, ниже которого находится морской порт Хатанга, принимающий морские суда и суда класса «река – море» с Лены; низовьев рек Котуй и Хета. Навигация продолжается порядка трёх месяцев (с июня по начало октября).

В бассейне р. Попигай находится крупнейший в мире метеоритный кратер. (включен в список Всемирного геологического наследия ЮНЕСКО). В низовьях реки находится Таймырский биосферный заповедник.

Хатанга протекает по малонаселенной людьми территории. Кроме одноименного посёлка (от устья реки 210 км) с населением 2645 человек,

одного из самых северных в стране населенных пунктов, есть также несколько малонаселённых посёлков на р. Хета и р. Котуй.

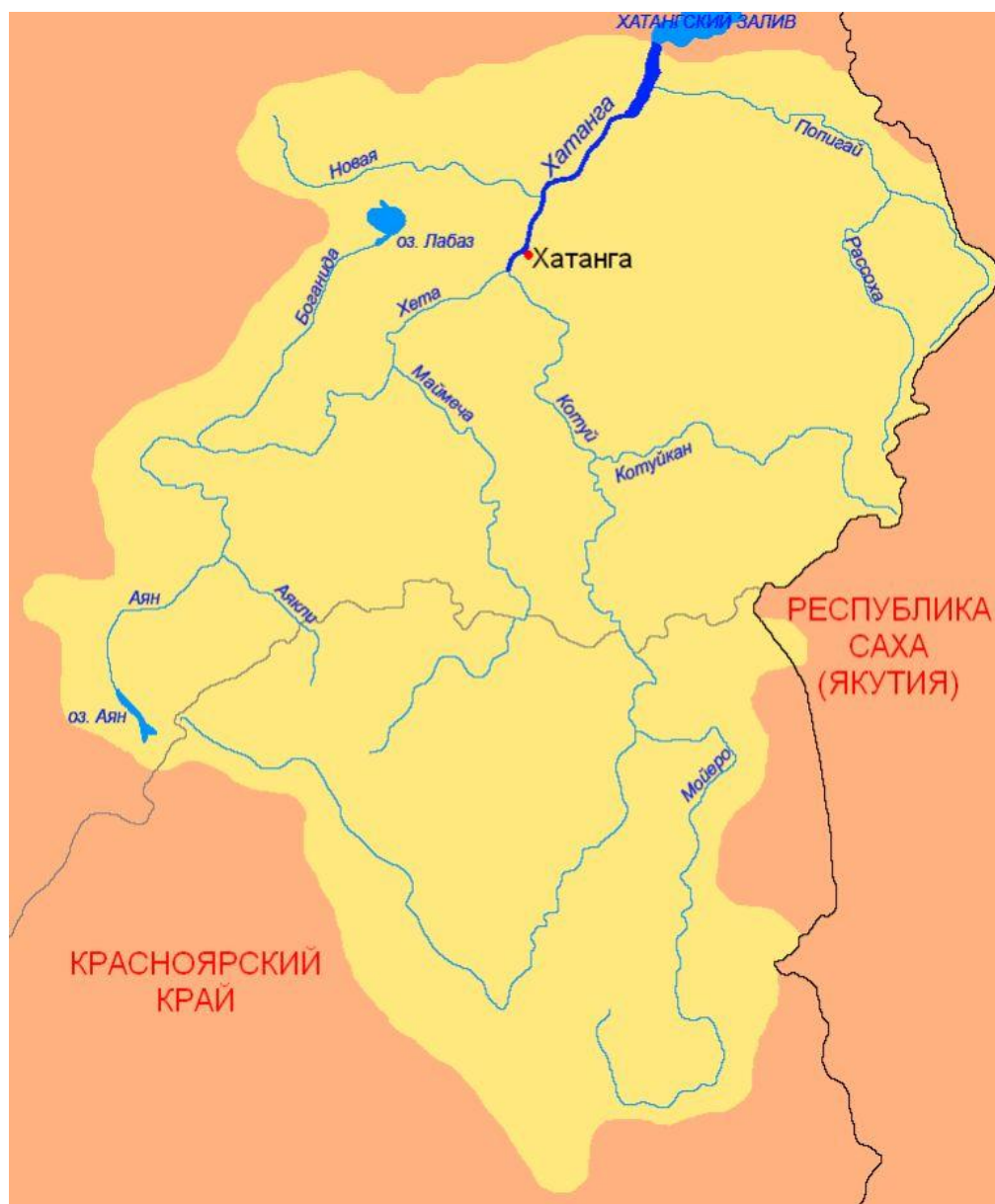


Рисунок 1.1 – Карта бассейна р. Хатанга и её устьевой области.

1.1 Географическое местоположение

Река Хатанга находится на севере Красноярского края, субъекта Российской Федерации, который на данный момент входит в состав Дальневосточного федерального округа. Она протекает по территории Таймырского Долгано-Ненецкого округа.

Исток расположен у слияния рек Котуй и Хета у посёлка Хатанга. Устье же располагается у Хатангского залива.

Координаты истока: Широта: 71°55'00" с. ш.

Долгота: 102°05'50" в. д.

Координаты устья: Широта: 73°07'56" с. ш.

Долгота: 106°08'31" в. д.

Сама река находится на территории Лено-Индигирского региона, расположенного в северо-восточной части Азиатского материка между 52°00' и 77°30' с.ш. и 92°30' и 160°00' в.д. на площади более 4.2 млн. км².

Наибольшая протяженность этой территории с севера на юг около 2740 км, с запада на восток более 2300 км. На севере она омывается водами морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, на западе граница ее проходит от северной точки мыса Челюскина по водоразделу между притоками оз. Таймыр и Хатангского залива и бассейнами рек Хатанги и Енисея и далее Лены и Енисея, на юге – по водоразделу между бассейнами рек Лены и Амура, на востоке – по водоразделу между бассейнами рек Индигирки и Колымы до устья последней. Большая часть указанной географической области находится в пределах Якутии. Кроме того, в нее частично входят: Таймырский и Эвенкийский национальные округа Красноярского края, Иркутская область, республика Бурятия, Читинская и Амурская области, Хабаровский край.

На западе территории находится относительно равнинное Среднесибирское плоскогорье, на севере, вдоль побережья, располагаются

обширные приморские низменности, на юге – Байкальская, а на востоке – Северо-Восточная горные области. Характерной особенностью всей территории является суровый и резко континентальный климат, повсеместное распространение многолетней мерзлоты, наличие наледей (особенно в горах). Лесной ландшафт на севере и в горных хребтах сменяется тундрой, а местами вечными снегами и льдами.

1.2. Рельеф и геологическое строение

Рассматриваемая территория принадлежит преимущественно крупнейшему тектонической структуре Восточной Сибири – Сибирской платформе. Строение рельефа, характер и условия залегания горных пород на ней неоднородны. На Сибирской платформе преимущественно развиты плоскогорья, пластовые плато и равнины, и только на южной ее окраине, в пределах Алданского щита, находится нагорье со сравнительно интенсивно расчлененным рельефом.

Сибирская платформа, Западная часть территории, охватывающая верхнюю и среднюю части бассейнов рек Анабара, Оленька, Вилюя, Лены и верховья Хатанги, относится к Среднесибирскому плоскогорью. Оно неоднородно в морфоструктурном отношении. Для западной части плоскогорья, включающей плато Путорана и Оленёкско-Вилюйское плато, характерно развитие столовых возвышенностей, поверхность которых бронирована траппами, широко представленными в вулканогенно-осадочном комплексе пород преимущественно триасового возраста, слагающих основание плато. Наиболее высокие отметки приурочены к плато Путорана, они достигают 1701 м при глубине вреза речных долин до 600-1000 м. Одновременно глубина вреза речных долин снижается до 400-100 м. Слоистое чередование в разрезе терригенных пород с пластовыми интрузиями и многочисленные дайки обуславливают ступенчатый профиль речных долин, наличие многочисленных порожистых участков и водопадов.

Река Хатанга течёт по Таймырской низменности, простирающейся вдоль побережья моря Лаптевых и далее на запад. Поверхность низменности сложена четвертичными аллювиально-озёрными и морскими отложениями, подстилаемыми мезозойскими (мел-юра) терригенными породами.

В данной местности присутствует множество озёр, крупнейшие — Таймырское, Лабаз. Местные озёра имеют термокарстовое и ледниковое происхождение. Территория весьма заболочена.

1.3 Растительный и почвенный покров

Территория бассейна реки Хатанги представлена таким типом почв, при которых даже в условиях вечной мерзлоты, свойственной для Средней Сибири, она при должных агротехнических мероприятиях может быть плодородна. Связано это с тем, что биологический круговорот веществ в почве совмещаются в ее маломощном деятельном слое. Именно поэтому продукты выветривания очень медленно выносятся из неё.

Тундровая зона характеризуется безлесием преобладанием безкорневых мхов и лишайников, наличием стелющихся видов (карликовая ива и береза) и подушкообразных растений, (камисломка). Изменение почвенного покрова и климата при переходе от северных границ тундры к южным приводит к заметным изменениям характера растительности. Поэтому в зоне тундр можно выделить несколько подзон.

Растительный покров арктической тундры разреженный и представлен в основном мхами и лишайниками. Значительную площадь занимают болота и озера. По берегам неглубоких озёр встречаются заросли арктофилов, осок и хвоща.

По побережью материка и берегам островов распространены приморские луга, которые формируются на засоленных почвах и систематически орошаются водами во время морских приливов и нагонов. На достаточно засоленных почвах развиваются группировки изосов,

бескильницы ползучей, а на менее засоленных почвах к ним присоединяются вейник щучковидный, фикус холодная и плевропогин Сабина с разнотравьем. На галечниках встречаются бутерковидная аммодея и пузырчатая меркия.

На большую площадь занимают мохово-лишайниковые, где господствуют многочисленные виды мхов и лишайников. Лишайники приурочены к сухим песчаным участкам и вершинам холмов и гряд. Моховые тундры не имеют сплошного распространения и обычно чередуются с лишайниковыми тундрами, болотами и другими тундровыми формациями. Эти тундры занимают низовья рек Хатанги, Анабара и Оленёк.

Южную часть тундры занимает кустарниковая тундра. Она хорошо представлена только в бассейнах нижних течений рек Хатанги, Анабара и Оленёк. В растительном покрове здесь господствуют ерники высотой до 1 м. По понижениям распространены ивы. Заросли кустарников чередуются пятнами стелющихся тундровых ивняков и моховых болот. Почвы под кустарниками всюду покрыты мхами и лишайниками, местами встречаются багульник или пушица. Много ягодных кустарников.

1.4 Климат местности

Климат рассматриваемой территории характеризуется резкой континентальностью, которая проявляется очень низкими зимними (-65°C) и высокими летними (до $20-35^{\circ}\text{C}$) температурами воздуха. Разность температур самого холодного и самого тёплого месяцев достигает мирового максимума и равна $46-55$. Наибольшие величины этих разностей свойственны долинам и котловинам, а распределение их по территории позволяет сделать вывод, о возрастании континентальности с запада на восток. На морских побережьях климат мягче, так как моря несколько обогревают берега осенью зимой и, наоборот, охлаждают в тёплое время года.

В зимний период территорию охватывает мощный сибирский антициклон, начинающий образовываться в сентябре. В антициклоне происходит формирование континентального, очень холодного воздуха. Ясная и сухая погода способствует охлаждению земной поверхности и нижних слоев воздуха. Дальнейшему развитию антициклона, достигающего своего максимума в январе-феврале, способствуют вторжения арктических воздушных масс.

Особенно сильное радиационное выхолаживание происходит в долинах и котловинах, куда стекает холодный воздух и где зимние температуры достигают исключительно низких значений. В холодное время года сильно развиты инверсии - повышения температуры воздуха с высотой, особенно мощные в горных районах. При сильных морозах и затишье часто образуются морозные туманы.

При резко выраженном антициклональном режиме погоды зимой преобладает затишье, но на побережье наблюдается также и циклоническая деятельность, сопровождающаяся сильными ветрами и метелями.

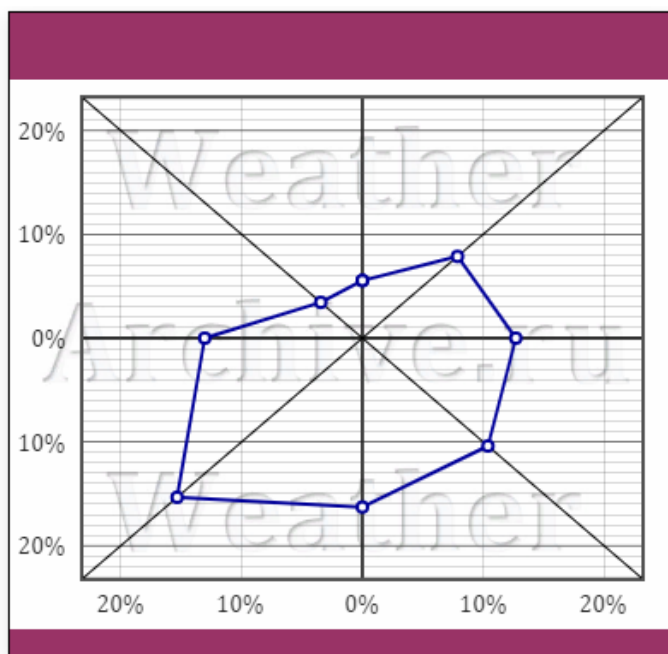
Зима на большей части территории малоснежная. В зоне тундры снежный покров залегает неравномерно из-за сдувания его сильными ветрами. Незначительный снежный покров и исключительно низкие зимние температуры способствуют широкому распространению многолетней мерзлоты, достигающей большой мощности.

Лето хоть и короткое, но тёплое, а иногда и жаркое, однако ночи обычно прохладные и почти повсюду территории, вероятны заморозки во все летние месяцы. На побережье и островах лето пасмурное и холодное, часто возникают туманы, число которых уменьшается по мере удаления от побережья. Во второй половине лета туманы образуются в долинах рек.

Переходные сезоны года кратковременны и характеризуются большими суточными амплитудами температур.

Продолжительность вегетационного периода возрастает с севера на юг. Осенью вторжение арктических воздушных масс обуславливает ранние заморозки, вначале редкие и слабые при довольно высокой температуре днём.

Арктические воздушные массы с малым влажностью свободно проникают из центральной Арктики в любое время года. Североатлантические тёплые воздушные массы поступают сильно иссушёнными, но с большим влажностью, чем арктические массы, и обычно приносят циклоническую погоду, сопровождающуюся на севере сильными ветрами и продолжительными метелями.



Роза ветров в городе Хатанга		
Направление		Частота
↓	Северный	5.6%
↙	Северо-восточный	11.1%
←	Восточный	12.7%
↘	Юго-восточный	14.7%
↑	Южный	16.3%
↗	Юго-западный	21.7%
→	Западный	13.1%
↖	Северо-западный	4.9%

Рисунок 4.4 – Роза ветров в г. Хатанга.

В общем на данной территории во все времена года господствует западный перенос воздушных масс, особенно интенсивный в тёплую часть года (с апреля по октябрь), когда тёплые и влажные воздушные массы поступают с запада и юго-запада.

Радиационный баланс значительно изменяется по территории. Среднегодовые его величины в общем увеличиваются с севера на юг. Так, например, на побережье арктических морей радиационный баланс составляет 14 ккал/см^2 . На большей части территории, начиная с октября, радиационный баланс имеет отрицательные значения. Наибольшие отрицательные величины баланса наблюдаются в ноябре-декабре. В это время его изменение по территории происходит в небольших пределах ($-0.5-2.2 \text{ ккал/см}^2$). Продолжительность периода с отрицательным балансом составляет 6-7 месяцев. Переход радиационного баланса от отрицательного к положительному происходит в марте-апреле. Наибольшие значения баланса наблюдаются в основном в июне и по территории изменяются в пределах $7-9 \text{ ккал/см}^2$.

Характерной чертой распределения температур почвы зимой является ее повышение с глубиной. Средняя месячная температура почвы на глубине

Режим осадков на рассматриваемой территории определяется условиями атмосферной циркуляции, географическим положением и характером рельефа. Благодаря резко выраженному антициклоническому режиму зима почти на всей территории сухая и малоснежная. Летом в результате развития циклонической деятельности выпадает наибольшее количество осадков за год.

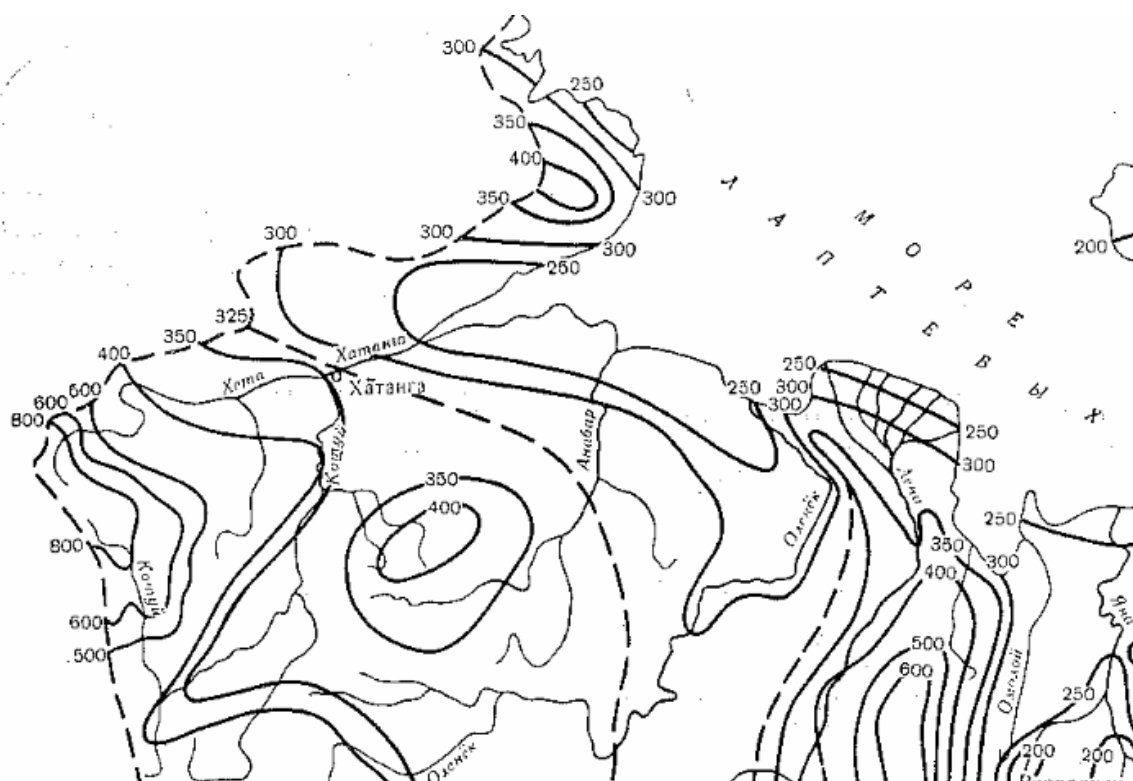


Рисунок 5.4 – Годовое количество осадков, мм.

На большей части территории снежный покров залегает в течение 220-250 дней в году, т. е. 7—8 месяцев. На побережье и в высоких горных районах снежный покров держится до 260—280 дней. Здесь он появляется в начале сентября и даже в конце августа, а исчезает в середине и конце июня.

Первый снег под влиянием последующих оттепелей обычно сходит, и устойчивый снежный покров образуется примерно через 8-15 дней после этого. На севере территории снежный покров устанавливается в третьей декаде сентября, а на юге - даже в начале первой декады ноября.

Высота снежного покрова вследствие антициклонического режима погоды сравнительно невелика. В тундровой зоне и на Яно-Оймяконском плоскогорье она составляет 25—30 см, увеличивается в бассейне Верхнего Алдана (более 50 см) и в верховьях Лены и уменьшается в Забайкалье, в верховьях Витима (менее 20 см). С открытых горных мест снег обычно сдувается, вследствие чего происходит его перераспределение и на защищенных от ветра участках высот снега несколько больше, чем на открытых. Эта разница составляет 5-12 см и лишь в районах с сильными ветрами достигает 10—20 см. Разрушение устойчивого снежного покрова на юге территории начинается с апреля и заканчивается в середине июня на побережье и в высокогорных районах.

Характерной особенностью местного снежного покрова является небольшая его плотность. Снег выпадает очень сухой и мало уплотняется в течение зимы. К началу снеготаяния его плотность обычно не превышает 0.16-0.18, в тундровой зоне составляет 0.20-0.25, на побережье 0.26-0.31; здесь сильными ветрами снег сдувается и образуются снежные валы.

Наибольший запас воды в снеге на большей части территории отмечается примерно в первой-второй декаде апреля, на юге — в середине марта, на севере и в высокогорных районах — лишь в конце апреля.

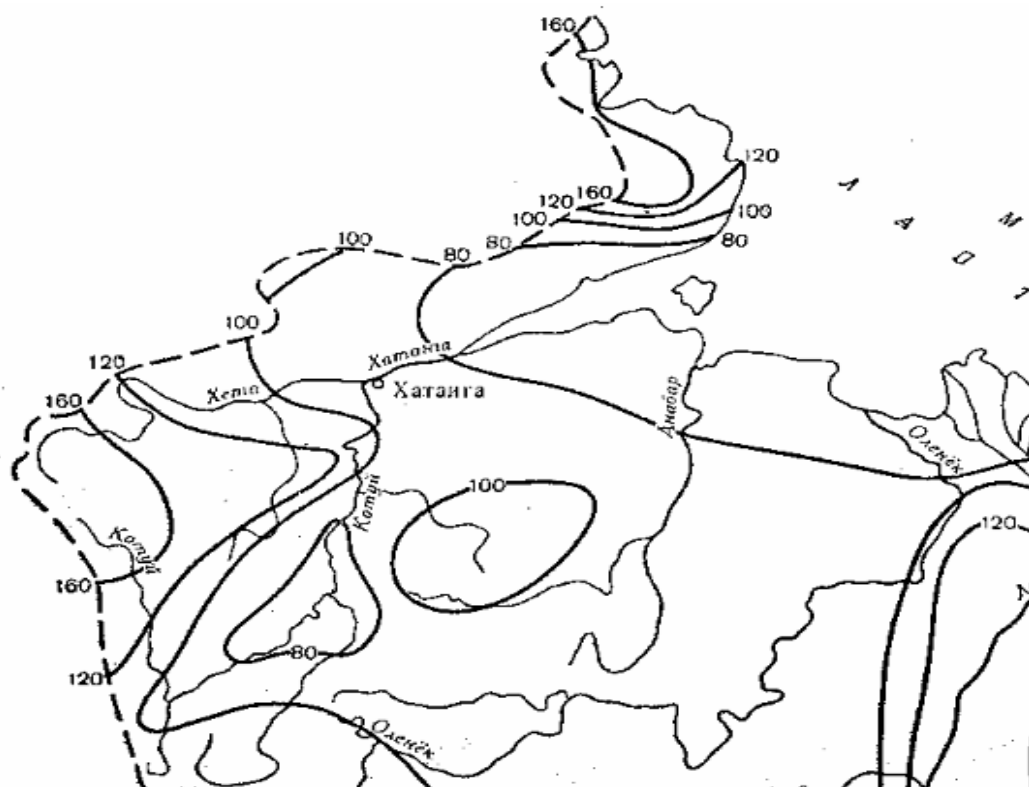


Рисунок 6.5 – Запасы воды в снежном покрове, мм.

1.5 Гидрометеорологическая изученность

Бассейн реки Хатанги в плане гидрометеорологии изучен недостаточно, поскольку она протекает в достаточно труднодоступном регионе с суровыми климатическими условиями вдали от большинства многонаселённых пунктов.

Единственный гидропост, который находился в пос. Хатанга, ныне закрыт. В настоящее время в связи с активной разработкой нефтяных и газовых месторождений в море Лаптевых и непосредственно на самом бассейне реки, есть надежда, что интерес к её изучению появится вновь.

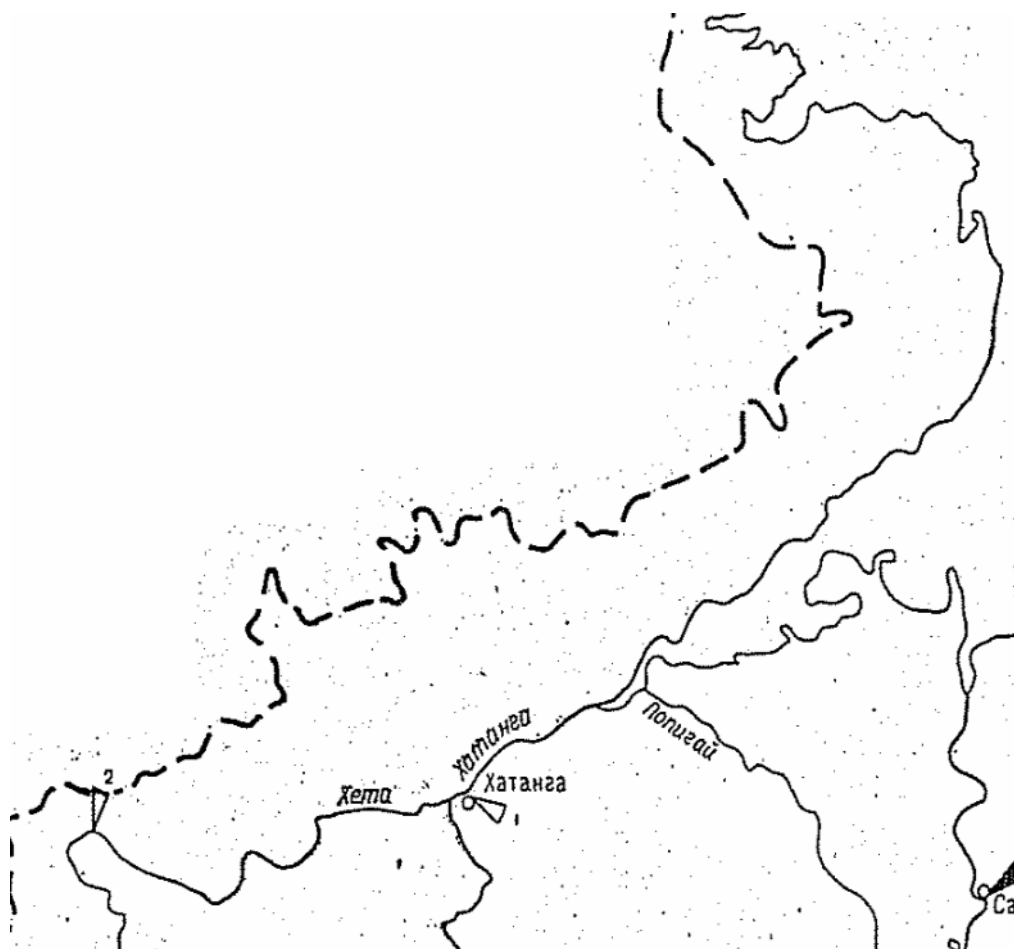


Рисунок 1.6 – Карта гидрометеорологических постов на р. Хатанга

1.6 Гидрологический режим

Длина реки Хатанга 227 км (от истока Котуя 1636 км), площадь бассейна 364 тыс. км². Впадает в Хатангский залив моря Лаптевых, формируя дельту выполнения. Дельта, образующаяся при впадении реки в мелководный залив. По площади бассейна Хатанга занимает 2-е место среди рек Красноярского края (после Енисея) и 9-е – в России.

Основные источники питания реки – снеговое и дождевое. Условия стока особенно благоприятны из-за высокой водонасыщенности почв и грунтов, позднего их оттаивания. Подземная составляющая стока незначительна из-за сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов.

По водному режиму Хатанга принадлежит к восточносибирскому типу. Весеннее половодье начинается обычно в конце мая – первых числах июня, ещё во время ледостава, и характеризуется резким подъёмом уровней, достигающим максимума в середине июня, в начале ледохода. Затем следует медленный спад уровней (на фоне дождевых паводков), продолжающийся вплоть до ледостава. Годовой диапазон изменения уровня воды составляет 6 – 10 м. На колебания уровней воды ниже слияния Хеты и Котуя накладываются нагоны, достигающие 2–2.5 м в устьевом створе; в меженный период проявляются и приливы. Максимальный месячный сток наблюдается в июне, составляя до 45–55% годового объёма. С октября отмечается резкое уменьшение стока.

Среднемноголетний расход воды у пос. Хатанга составляет 2370 м³/с, максимальный расход – 32.8 тыс. м³/с. К устью среднемноголетний расход воды возрастает до 3320 тыс. м³/с, что соответствует объёму стока в 104.83 км³/год.

Воды реки отличаются небольшо й мутностью (в среднем менее 55 г/м³). Наибольшая мутность отмечена в период половодья (до 140–

170 г/м³), наименьшая – в зимние месяцы. Средний сток наносов у пос. Хатанга равен 5.2 млн т/год. Среднемноголетний тепловой сток реки в море Лаптевых $2.1 \cdot 10^{15}$ кДж. Сток солей достигает 6.3 млн. т/год. Основные загрязняющие вещества в воде реки – нефтепродукты. Условия самоочищения воды в реке средние.

Суровый климат при незначительной толщине снежного покрова обуславливает образование ледяного покрова толщиной до 1.5–2 м. Река замерзает в конце сентября-середине октября, ледостав длится в среднем 235 дней. Вскрытие реки происходит в середине мая - середине июня.

2 Моделирование эстуарных процессов рек

2.1 Понятие моделирования

Компьютерное моделирование было впервые введено в качестве научного инструмента в метеорологии и ядерной физике в период непосредственно после Второй Мировой Войны, и с тех пор стало незаменимым инструментом решения задачи в растущем числе дисциплин. Список наук, широко использующих компьютерное моделирование, расширился до астрофизики, физики элементарных частиц, материаловедения, инженерии, механики жидкости, климатологии, эволюционной биологии, экологии, экономики, теории принятия решений, медицины, социологии, эпидемиологии и многих других. Есть даже несколько дисциплин, таких как теория хаоса и теория сложности, само существование которых возникло вместе с развитием вычислительных моделей, которые они изучают.

В самом узком смысле компьютерное моделирование - это программа, выполняемая на компьютере и использующая пошаговые методы для исследования приближенного поведения математической модели. Обычно это модель реальной системы (хотя рассматриваемая система может быть воображаемой или гипотетической). Такая компьютерная программа представляет собой компьютерную имитационную модель. Один запуск программы на компьютере—это компьютерное моделирование системы. Алгоритм принимает в качестве входных данных спецификацию состояния системы (значения всех её переменных) в некоторый момент времени t . Затем он вычисляет состояние системы в момент времени t_{+1} . Исходя из значений, характеризующих это второе состояние, он затем вычисляет состояние системы в момент времени t_{+2} и так далее. При запуске на компьютере алгоритм, таким образом, создает численную картину эволюции состояния системы, как это концептуализируется в модели.

Эта последовательность значений переменных модели может быть сохранена в виде большого набора “данных ” и часто просматривается на экране компьютера с использованием методов визуализации. Часто, но, конечно, не всегда, Методы визуализации предназначены для имитации результатов работы какого—либо научного инструмента-так что моделирование представляется измерением системы, представляющей интерес.

Иногда используются пошаговые методы компьютерного моделирования, поскольку интересующая модель содержит непрерывные (дифференциальные) уравнения (которые задают непрерывные скорости изменения во времени), которые не могут быть решены аналитически —ни в принципе, ни, возможно, только на практике. Но даже в качестве узкого определения это определение должно быть прочитано внимательно и не должно предполагать, что моделирование используется только тогда, когда в модели имеются аналитически неразрешимые уравнения. Компьютерное моделирование часто используется либо потому, что исходная модель сама содержит дискретные уравнения, которые могут быть непосредственно реализованы в алгоритме, подходящем для моделирования, либо потому, что исходная модель состоит из чего—то, что лучше описывается как правила эволюции, чем как уравнения.

В первом случае, когда уравнения “дискретизируются” (превращение уравнений, описывающих непрерывные скорости изменения, в дискретные уравнения), следует подчеркнуть, что, хотя обычно говорят о моделировании, решающем эти уравнения, дискретизация может в лучшем случае найти только то, что приближает решение непрерывных уравнений до некоторой желаемой степени точности. Наконец, говоря о “компьютерном моделировании” в самом узком смысле, имеется в виду конкретная реализация алгоритма на конкретном цифровом компьютере, написанная на определённом языке, использующая определённый компилятор и т.д.

Существуют случаи, когда различные результаты могут быть получены в результате вариаций в любой из этих особенностей.

Некоторые имитационные модели являются гибридами различных видов методов моделирования. Многомасштабные имитационные модели, в частности, соединяют вместе элементы моделирования из разных масштабов описания. Хорошим примером этого может служить модель, которая моделирует динамику объёмного вещества, рассматривая материал как поле, подвергающееся напряжению и деформации на относительно грубом уровне описания, но которая приближается к конкретным областям материала, где происходят важные маломасштабные эффекты, и моделирует эти более мелкие области с относительно более мелкозернистыми методами моделирования. Такие методы могут опираться на молекулярную динамику, квантовую механику или на то и другое вместе - каждое из них представляет собой более тонкое описание материи, чем то, которое предлагается при рассмотрении материала как поля. Многомасштабные методы моделирования могут быть дополнительно разбиты на последовательные многомасштабные и параллельные многомасштабные методы. Более традиционным методом является последовательное многомасштабное моделирование. Идея здесь состоит в том, чтобы выбрать область, смоделировать её на более низком уровне описания, суммировать результаты в набор параметров, удобоваримых моделью более высокого уровня, и передать их в часть алгоритма, вычисляющего на более высоком уровне.

Последовательные многомасштабные методы не эффективны, когда различные масштабы сильно связаны друг с другом. Когда различные шкалы сильно взаимодействуют для получения наблюдаемого поведения, требуется подход, который моделирует каждую область одновременно. Это называется параллельным многомасштабным моделированием. Параллельное многомасштабное моделирование является основой почти повсеместного метода моделирования: так называемого "подсеточного" моделирования. Под сеточным моделированием понимается представление важных

маломасштабных физических процессов, происходящих на протяженных масштабах, которые не могут быть адекватно разрешены на сеточном размере конкретного моделирования.

В климатологии и смежных дисциплинах подсеточное моделирование называется "параметризацией". Это, опять же, относится к методу замены процессов - тех, которые слишком маломасштабны или сложны, чтобы быть физически представленными в модели — более простым математическим описанием. Это в отличие от других процессов - например, крупномасштабного течения атмосферы, которые рассчитываются на сеточном уровне в соответствии с основной теорией. Это называется "параметризацией", потому что различные нефизические параметры необходимы для управления высоко аппроксимативными алгоритмами, которые вычисляют значения подрешетки. Примеры параметризации при моделировании климата включают скорость падения дождевых капель, скорость переноса атмосферного излучения и скорость образования облаков. Например, средняя облачность над сеткой площадью 100 км^2 не имеет четкой связи со средней влажностью над коробкой. Тем не менее, по мере увеличения средней влажности средняя облачность также будет увеличиваться — следовательно, может существовать параметр, связывающий среднюю облачность со средней влажностью внутри сетки. Несмотря на то, что современные параметризации формирования облаков являются более сложными, чем это, основная идея хорошо иллюстрируется на примере. Использование методов подсеточного моделирования в моделировании имеет важные последствия для понимания структуры эпистемологии моделирования. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в разделе 4.

Методы подсеточного моделирования можно противопоставить другому виду параллельной многомасштабной модели, где подсеточные алгоритмы более теоретически принципиальны, но мотивированы теорией на другом уровне описания. В примере моделирования объемной материи, упомянутом выше, например, алгоритм, приводящий к меньшему уровню

описания, не строится сиденьем штанов. Алгоритм, управляющий меньшим уровнем, на самом деле более теоретически принципиален, чем более высокий уровень, в том смысле, что физика более фундаментальна: квантовая механика или молекулярная динамика. механика сплошной среды.

2.2 Устьевая область реки Хатанга

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.

Устье реки Хатанги расположено в пределах аккумулятивной равнины, образованной, как правило, поздними депрессиями. Положение борозды в устье реки Хатанга и Хатангского залива продиктовано разломами в земной коре. Бороздина реки Хатанги из русла идёт простирается в залив, где она окружена подводной террасой на глубине 11-13 м. Геоморфологическими границами эстуарно-дельтовой системы Хатанги являются: нижняя – субаквальный морской край устьевого бара и верхний – вершина древнего эстуария в месте слияния Хетты и Котуя, выработанного в меловых отложениях и заполненного речными осадками.

Устьевая система р. Хатанги имеет большую протяженность (более 400 км) и состоит из двух примерно равнозначных частей: авандельты в виде современного эстуария и дельтового района, представляющих собой вершинную часть древнего эстуария, заполненного речными наносами. Эстуарий Хатанги практически совпадает с Хатангским заливом моря

Лаптевых длиной 210 км. Залив омывает восточное побережье п-ова Таймыр и западные берега материка с п-овами Хара-Тумус и Юрюнг-Тумус (Нордвик). От открытого моря залив отделён о. Большим Бегичевым, по обеим сторонам которого находятся проливы Северный (ширина 13 км) и Восточный (ширина 8 км). Средняя ширина Хатангского залива – 37 км, наибольшая – 54 км. Глубины в нём не превышают 29 м. Площадь Хатангского залива составляет 559 тыс. км². Ниже устьевого створа эстуария Хатанги в открытой части моря Лаптевых формируется мелководный устьевой бар площадью до 1000 км² с преобладающими глубинами 0.5–3 м.

Дельтовый район занимает нижнюю часть долины р. Хатанги протяжённостью 240 км от морского края современной дельты заполнения до слияния рек Хеты и Котуя (пос. Кресты). Долина имеет вид постепенно расширяющегося вниз по течению раструба шириной от 1 до 15 км. В 220 км от устья река течёт одним руслом, а затем начинает делиться пойменными островами на протоки и рукава. Ниже п-ова Кресты река вновь собирается в одно русло шириной до 1 км с глубинами от 8 до 20 м.

Приливные волны на реках АЗРФ могут проходить огромные расстояния по руслу. На р. Хатанге прилив распространяется на 227 км вниз по течению, и его волна может достигать высоты 1.5 м.

3 Построение цифровой модели устьевой области р. Хатанги.

В определении особенностей гидрологического режима любой реки огромную роль играют морфометрические (гидрографические) характеристики речных водосборов - площадь водосбора, средняя ширина, высота, залесённость, заболоченность, озёрность, длина реки, её уклон и т.д. Эти основные параметры широко используются в расчётных формулах.

Для создания цифровой модели устьевой области р. Хатанги предполагалось использование двух возможных путей создания морфометрической основы, на которых она будет строиться.

3.1. Оценка возможностей построения цифровой модели рельефа с помощью модели высотных данных местности GMTED2010.

Данные высот, помимо классической топографической съёмки нужной местности, ещё могут быть извлечены из стерео-пары изображений, используя алгоритмы фотограмметрии. Стерео-пара – это два изображения на одну и ту же территорию, снятые с различных углов из различных географических положений. Пара стерео-изображений в коллекции изображений используется для создания облака точек (3D точки), для которых могут воспроизведены данные высоты.

Одной из баз данных стерео-изображений поверхности Земли является GlobalMulti-resolutionTerrainElevationData 2010 (GMTED2010), модель высотных данных местности. Данная модель, которая заменяет устаревшую GTOPO30, является продуктом сотрудничества между Геологической службой США (USGS) и Национальной геопространственной разведки (NGA) в области развития геоинформационных систем. Она в своём наборе продуктов содержит семь новых растровых высотных продуктов для каждого

из 30-, 15- и 7.5- угловых секунд пространственного разрешения. Новые продукты высоты были произведены с помощью следующих методов:

- минимальная высота
- максимальная высота
- средняя высота
- стандартное отклонение высот
- систематическая выборка
- акцент структурных линий

Метаданные содержат информацию о источнике и атрибутах всех входных данных высот. Многие из этих продуктов пригодны для различных региональных континентального масштаба отображения растительного покрова, добычи дренажной функции для гидрологического моделирования, а также геометрические и радиометрические коррекции среднего и низкого разрешения данных спутниковых изображений. Новая модель составлена по данным нескольких источников (DTED, SRTM, ICESat и др.) и представлена в трех вариантах с пространственным разрешением приблизительно 1000, 500 и 250 метров (30, 15 и 7.5 угловых секунд). Данные приводятся для суши и поэтому распространяются только до 84° с.ш. и 56° ю.ш. Вертикальная точность GMTED2010 может быть сведена в плане разрешения и RootMeanSquareError (СКО) продукции по отношению к глобальным наборам контрольных точек (по оценкам глобальной точности 6м СКО), предоставленные NGA:

- 30 угловых секунд СКО составляет от 25 до 42 метров,
- 15 угловых секунд СКО составляет от 29 до 32 метров,
- 7.5 угловых секунд СКО составляет от 26 до 30 метров.

В связи с отсутствием данных более точных моделей высотных данных местности, вроде SRTM и ASTER GDEM2, для таких северных широт, в которых находится устьевая область р. Хатанги (73° с.ш.), пришлось

использовать менее точную, но бесплатную и более доступную 7.5 угловую съёмку GMTED2010.

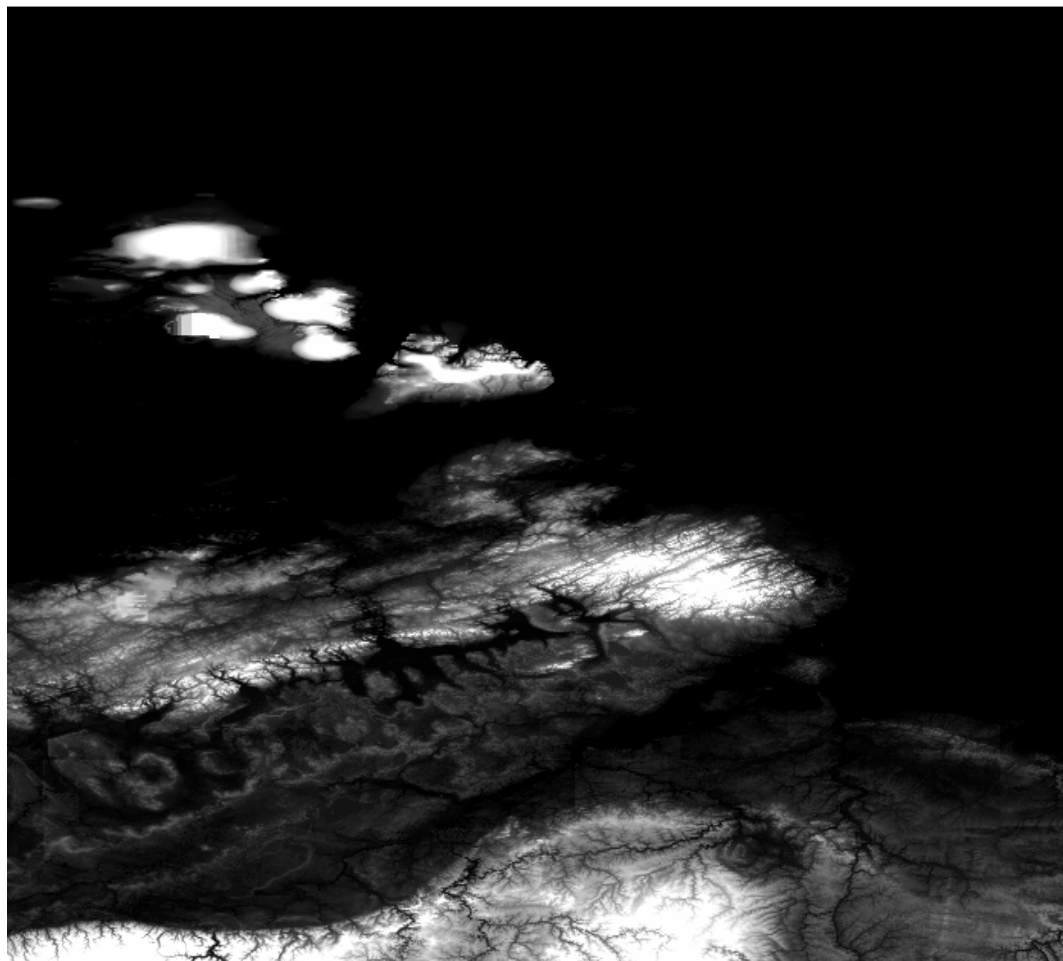


Рисунок 3.1 – Радарный 7.5 секундный растровый снимок п-ова Таймыр и УО р. Хатанги в модели GMTED2010.

3.2 Построение и визуализация цифровой модели рельефа

Для построения цифровой 3D модели местности в условиях отсутствия детальной съёмки рельефа в первую очередь необходимо раздобыть данные высотно-планового обоснования. Данная информация содержится на сайте геологической службы США (USGS) в их онлайн-картографическом сервисе.

Для построения ЦМР был выбран пробный участок от начала Хатангского залива до впадения реки Малая Балахня в Хатангу. Данный сервис способен выделить нужную область с помощью полигона, после чего нужно выбрать интересующую модель высотных данных, имеющую снимки данной местности.

В конце модель была загружена в виде архива растровых снимков в формате .tif (TaggedImageFormat).

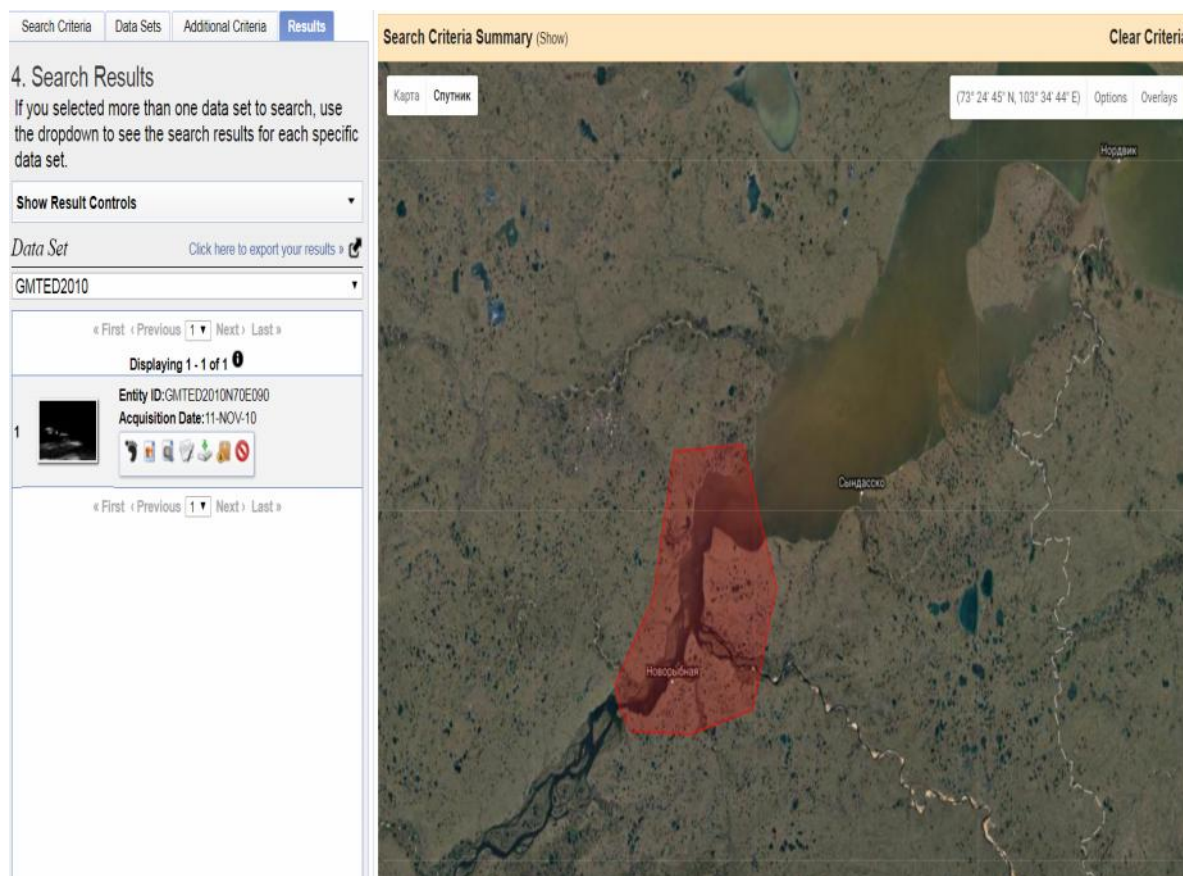


Рисунок 3.2. Выделенный полигоном участок устьевой области Хатанги и готовый к скачиванию архив снимков GMTED2010.

Необходимо найти программу, способную в загруженном растровом снимке формата .tif найти все значения высотных точек, сохранить их пространственные координаты, в данном случае всемирная система геодезических параметров Земли 1984 года (WGS 84), и построить по ним карту изолиний. На это способны программы SketchUp, GlobalMapper, QGIS и SASPlanet. В этой работе ввиду простоты и эффективности работы была использована программа QGIS, построившая карту изолиний с шагом через 1 м для большей точности и наглядности.

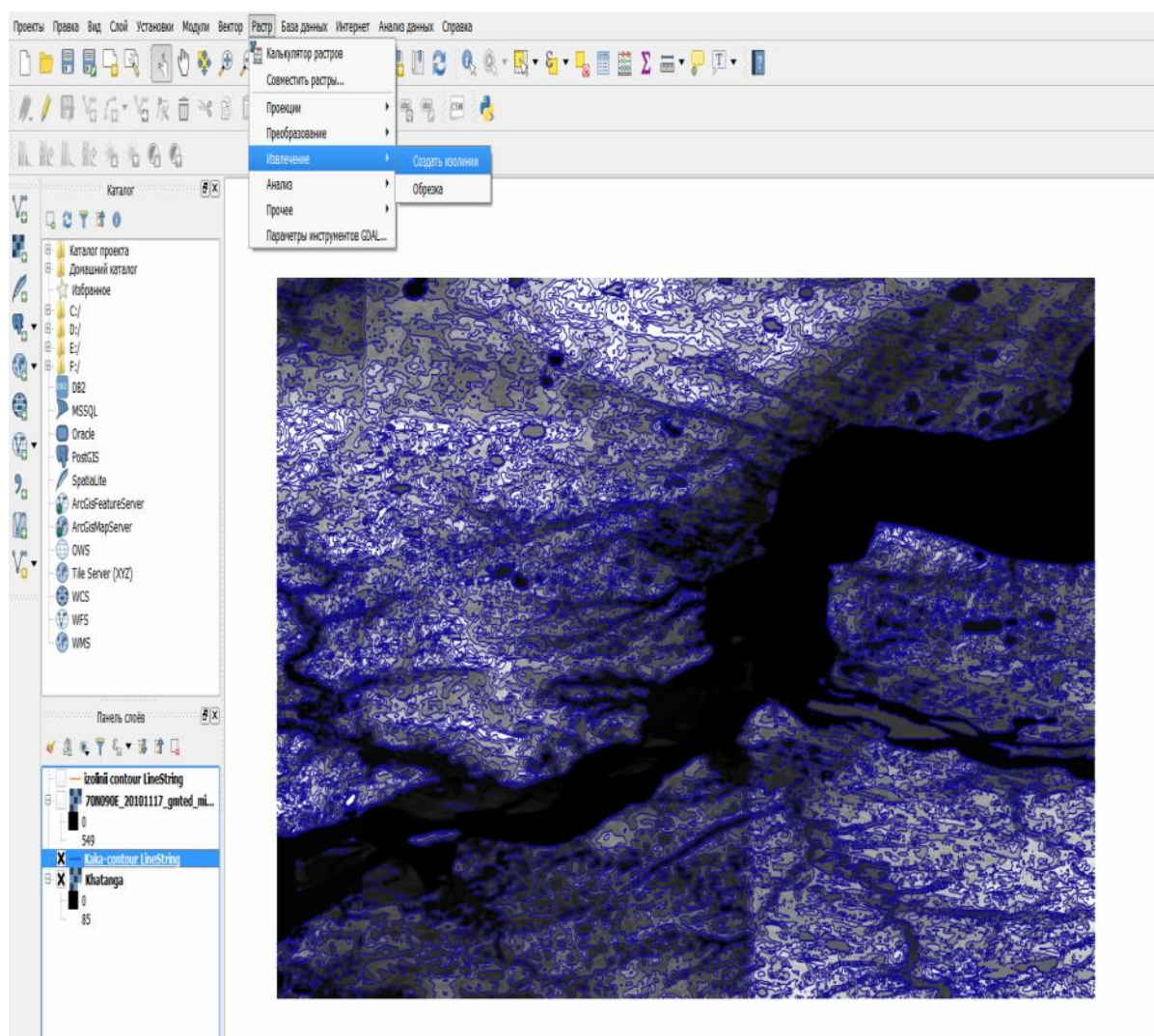


Рисунок 3.3 – Пример карты изолиний с шагом через 10 м, построенной на основе растрового снимка GMTED2010 в программе QGIS.

Получившуюся карту изолиний необходимо экспортировать в ArcGIS, который сможет построить по ним 3D модель и её визуализировать. Эта программа из карты изолиний способна создать TIN-поверхность (TriangularIrregularNetworks), нерегулярную триангуляционную сеть, используемую в ГИС в течение многих лет и являющуюся способом цифрового отображения структуры поверхности. В итоге ArcGIS создаёт 3D модель местности с её пространственными координатами, которую в дальнейшем можно визуализировать в различных программах, наподобие ArcScene.

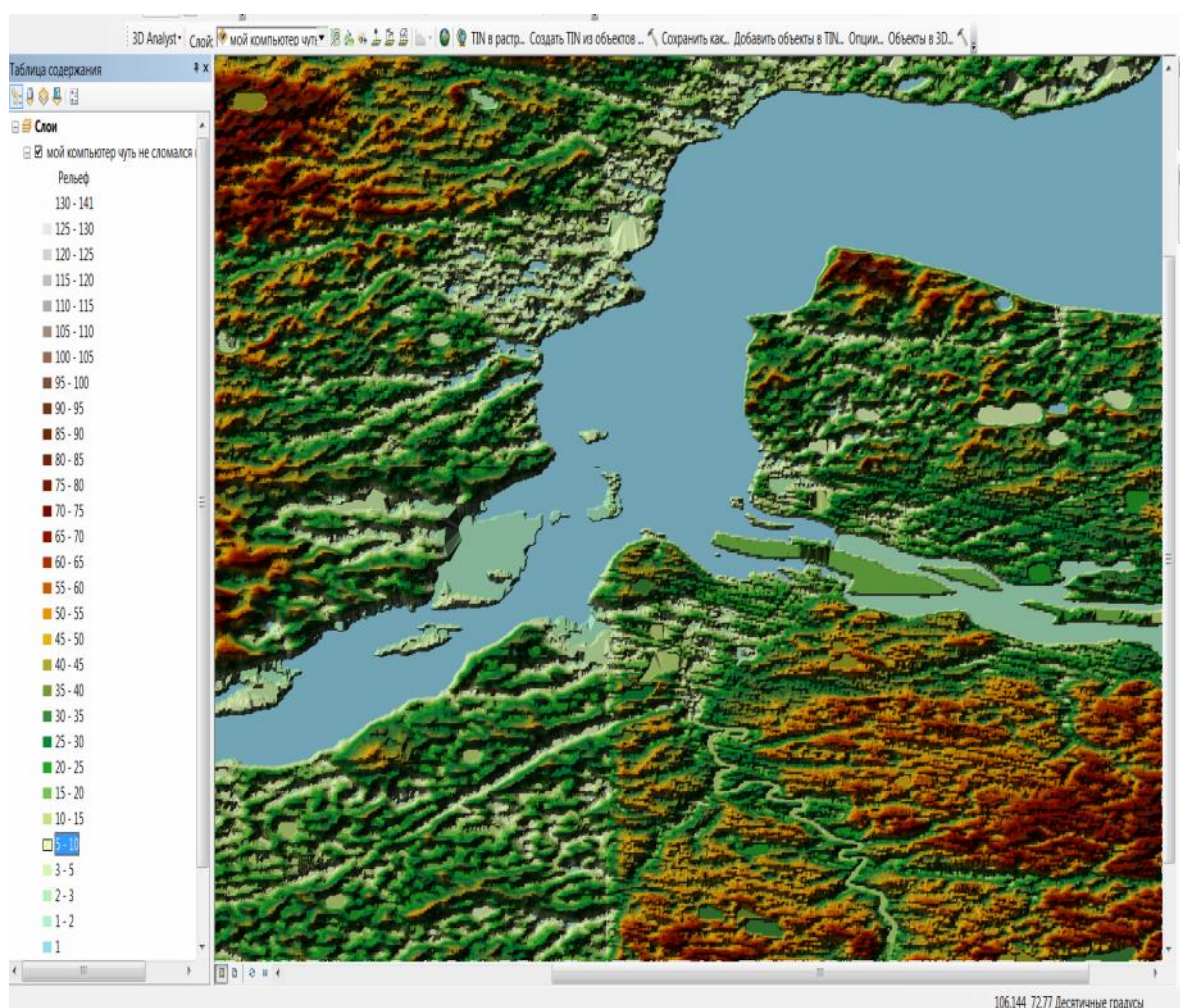


Рисунок 3.4 – Построенная и ранжированная по высотам 3D модель участка устьевой области Хатанги.

Самым простым путём визуализации построенной модели будет наложение космического снимка из программы GoogleEarthPro с последующим его экспортом и пространственной привязкой в ArcGIS. Последним этапом построения и визуализации данной модели будет её отображение в программе ArcScene, позволяющей построить интерактивную 3D модель с функцией её обзора. Для это нужно было экспортировать в неё построенную TIN-поверхность с привязанным снимком и задать вертикальный масштаб.

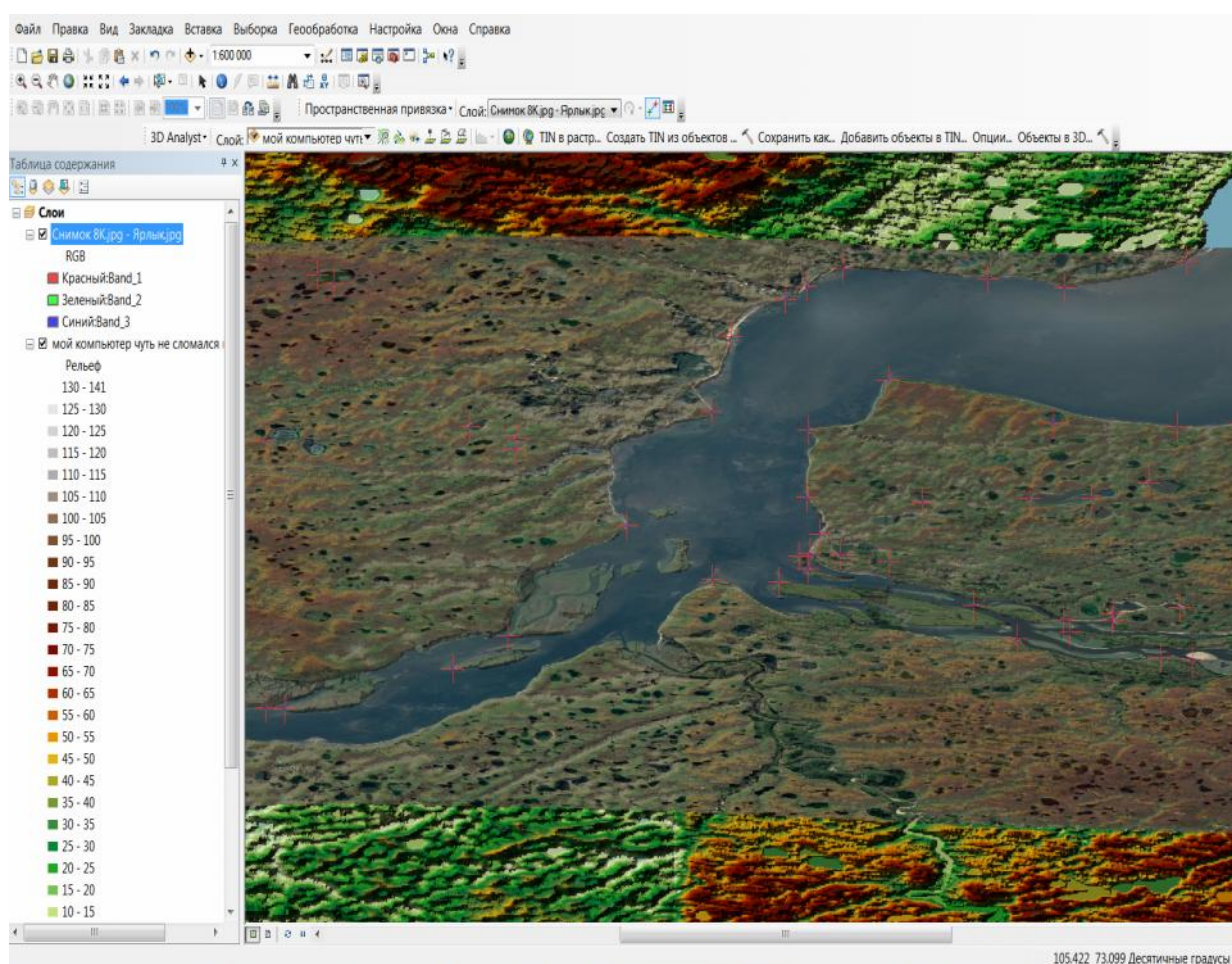


Рисунок 3.5 – Наложенный и привязанный к модели космический снимок участка устьевой области р. Хатанги.

Но при использовании любых глобальных ЦМР, наподобие GMTED2010, для моделирования расчётных рек, в зависимости от целей и задач, русловые и пойменные участки рекомендуется уточнять дополнительными промерами и съемками. Использование для подобных задач только лишь глобальных ЦМР некорректно, так как погрешность определения уровня воды в таком случае может достигать огромных значений, что является абсолютно неприемлемым. На практике, при решении изыскательских и инженерных задач, где требуется достаточно точная оценка, рельеф дна и поймы должен быть обязательно уточнен путём русловой съёмки и детальных топографических работ.

Именно поэтому для устранения возможных неточностей и погрешностей в построении модели производилась оцифровка и обработка картографических материалов р. Хатанга в виде лоций и карт с нанесёнными изобатами.

3.3 Оцифровка и нанесение изобат с помощью лоций р. Хатанга и карт Генштаба масштаба 2 км Хатангского залива

Для создания общей карты изобат устьевой области р. Хатанга была использована программа Photoshop.

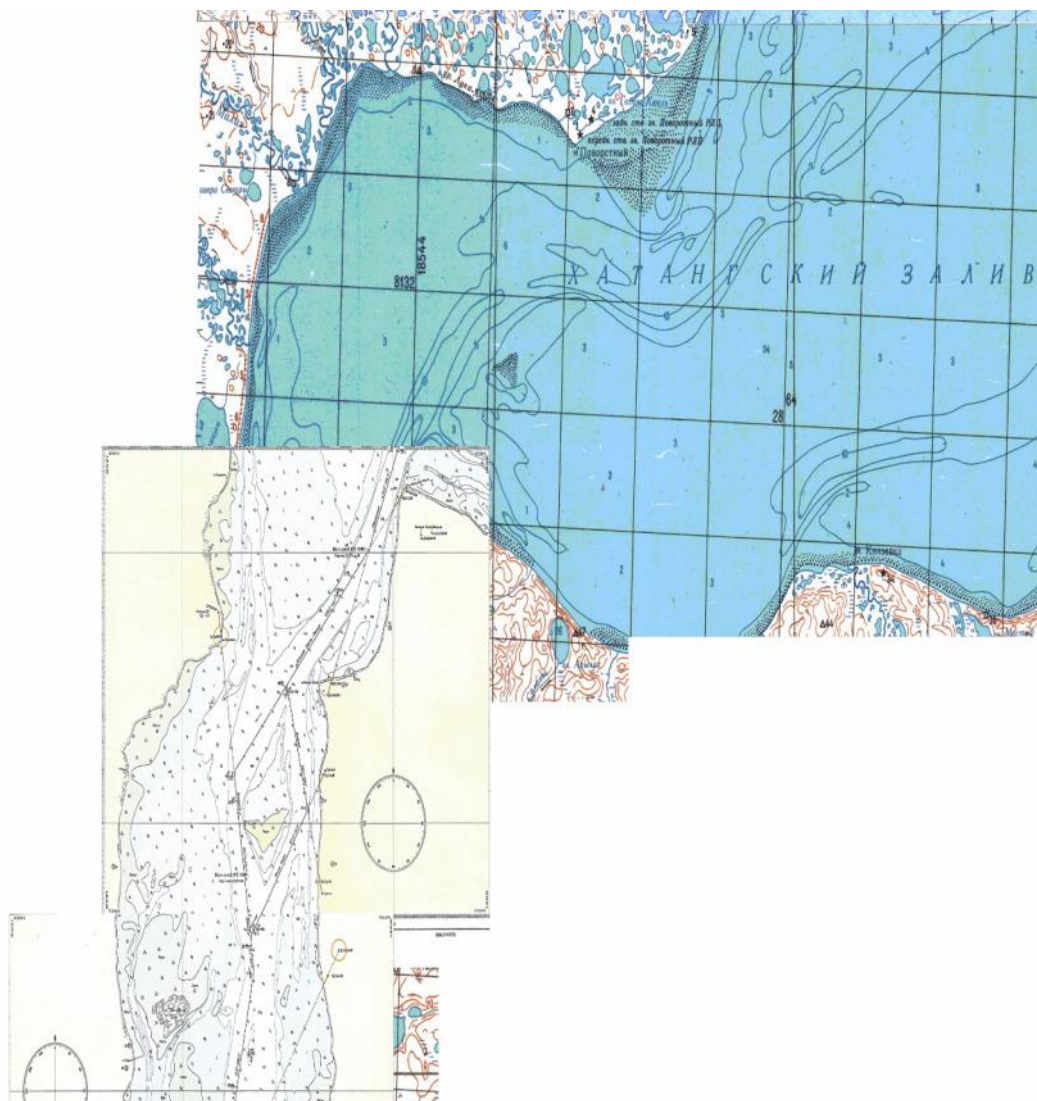


Рисунок 3.6 – Фрагмент склейки карт в районе впадения р. Хатанга в Хатангский залив.

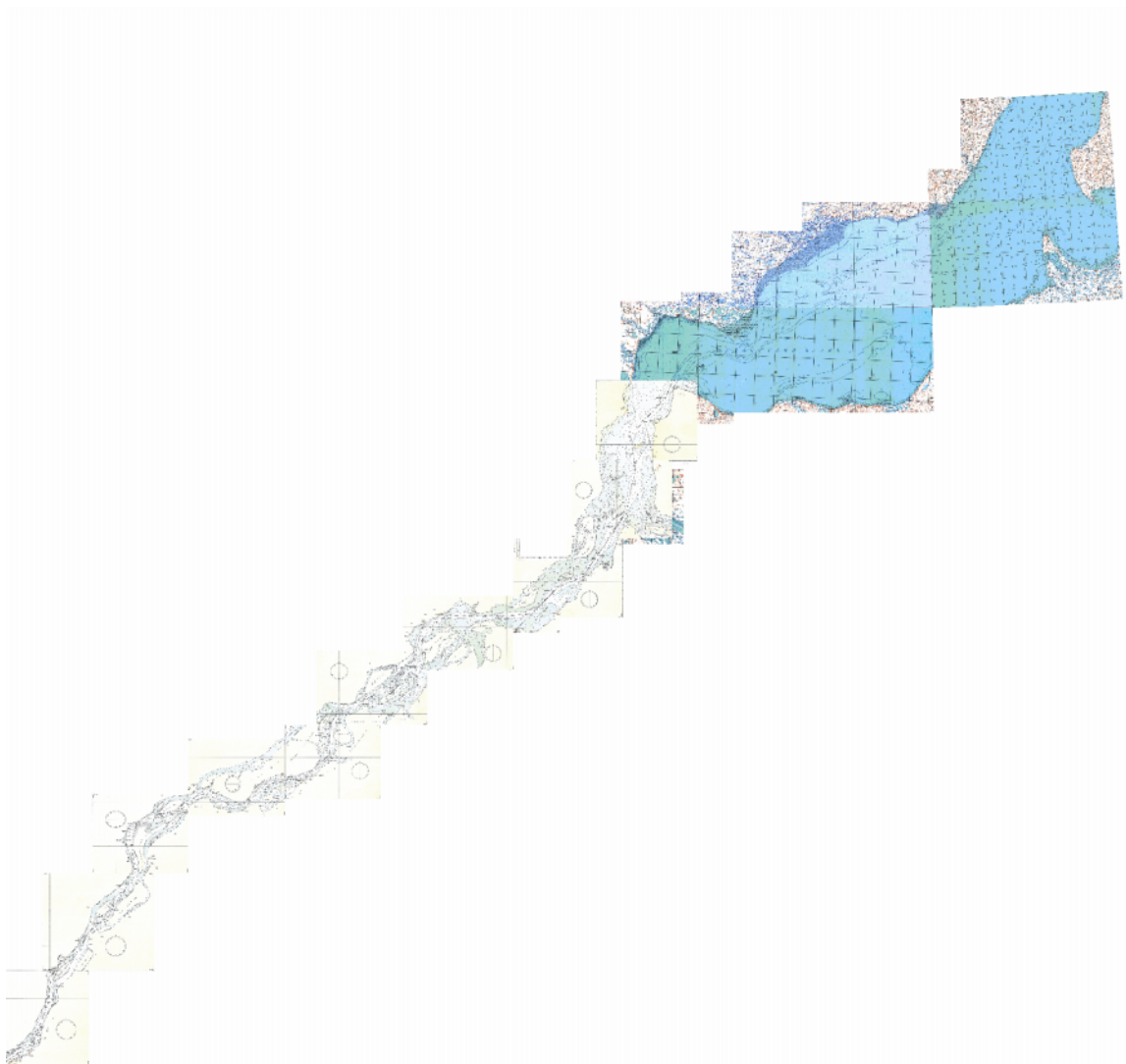


Рисунок 3.7 – Общая скомбинированная карта изобат от п. Хатанга до о. Большой Бегичев с общей длиной 418 км.

Оцифровка изобат проводилась с помощью программы Civil 3D (Рисунок 3.8).

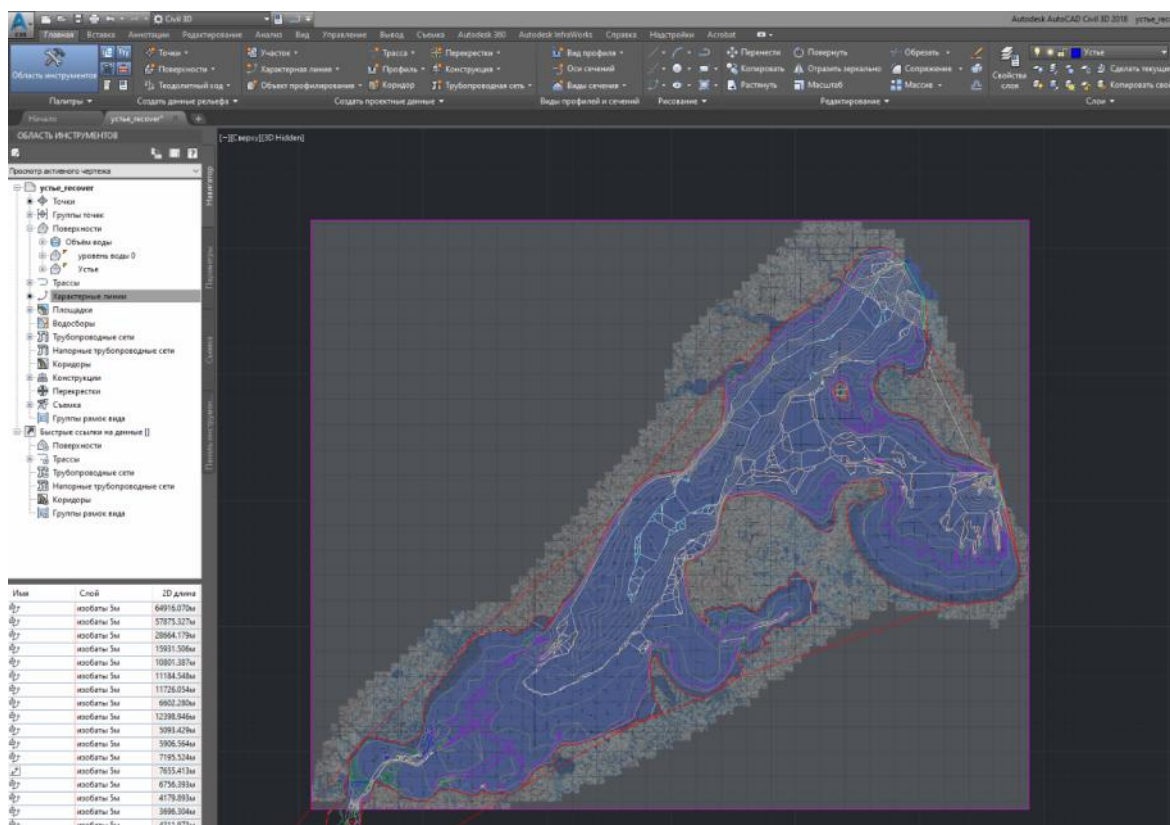


Рисунок 3.8 – Пример оцифрованных изобат на участке Хатангского залива.

Следующим этапом являлся экспорт получившейся модели изобат в программный комплекс HEC-RAS. Для этого на построенной TIN-поверхности рельефа дна р. Хатанга была нанесена осевая линия, которая выполняла роль линию направления потока воды от условного истока (п. Хатанга) до её устья (место впадения реки в Хатангский залив). На всём протяжении реки через каждые 5 км были построены полилинии, выполняющие роль пикетов, идущих от бровки левого берега к бровке правого.

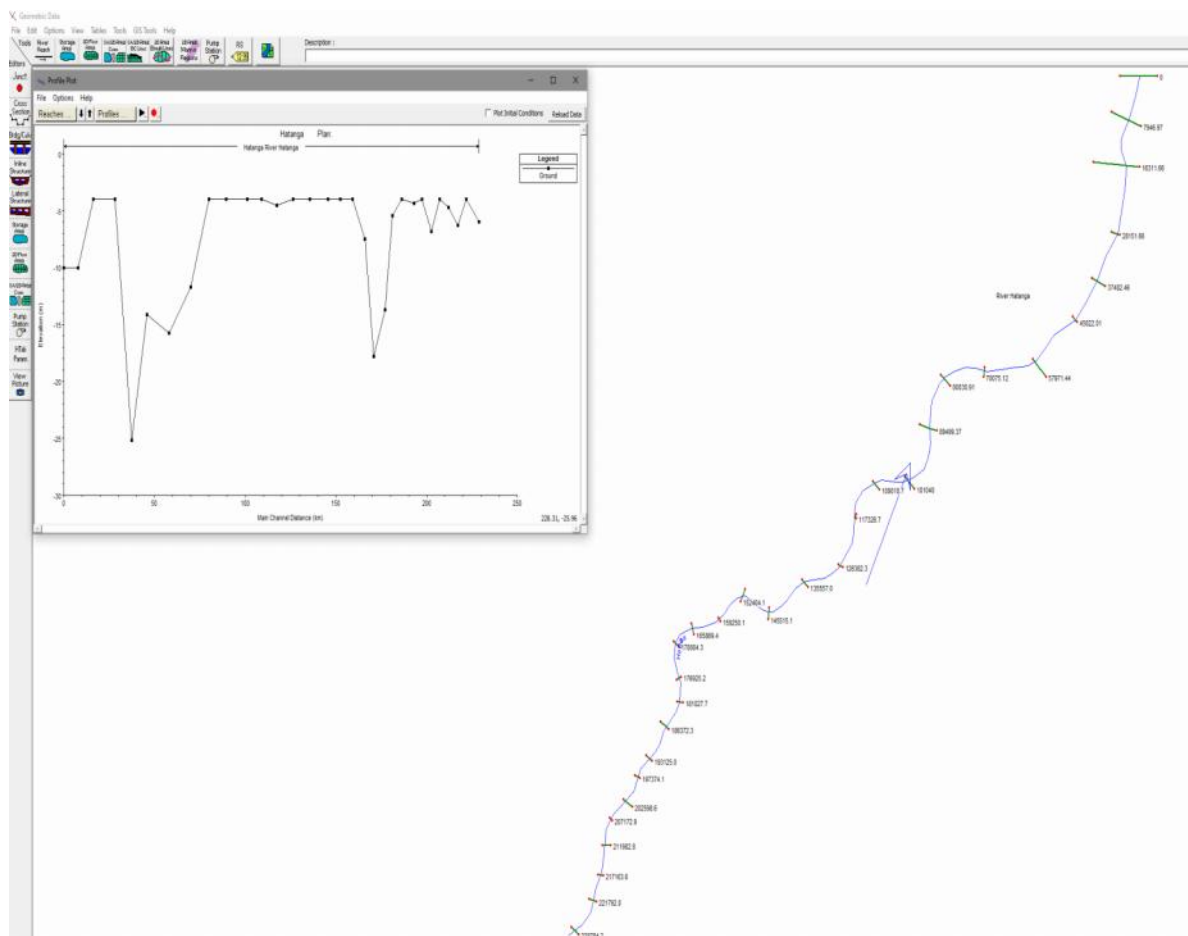


Рисунок 3.9 –Осевая линия потока с пикетами.

Получившиеся геометрические данные, необходимые для построения 2D модели реки, к сожалению, использовать в полном объёме не удалось, т.к. импортированную из программы CIVIL3D оцифрованную батиметрическую карту УО Хатанги и Хатангского залива программный комплекс HEC-RAS не способен был совместить в одной географической системе координат, ввиду неточности растрового снимка GMTED10 в определении русла реки. Данная ошибка в её определении не позволяла HEC-RAS производить какие-либо расчётные операции для построения модели потока в русле реки.

Ввиду этого было принято решение строить модель лишь одного участка реки непосредственно на ЦМР с чётким определением русла без какой-либо батиграфии для оценки возможностей программного комплекса HEC-RAS.

4 Работа с программным комплексом HEC-RAS

4.1 Общие сведения о программном комплексе HEC -RAS

Первая версия программного комплекса HEC-RAS была создана в Гидрологическом инженерном центре Корпуса гражданских инженеров армии США в 1995 году. В версию программы HEC -RAS 5.0.7 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.

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

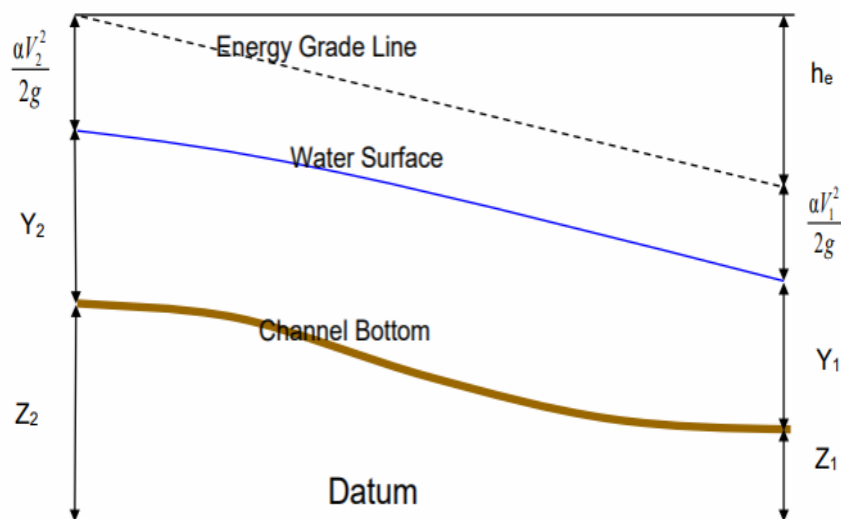


Рисунок 4.1 - Визуализация уравнения сохранения энергии.

Главным принципом расчёта является деление потока на составные части: руслореки, пойму и коренной берег. Задавав для каждой из секций коэффициент шероховатости Гоклера-Маннинга, комплекс рассчитывает значения скорости и расхода воды в данных 5 секциях и на их границах.

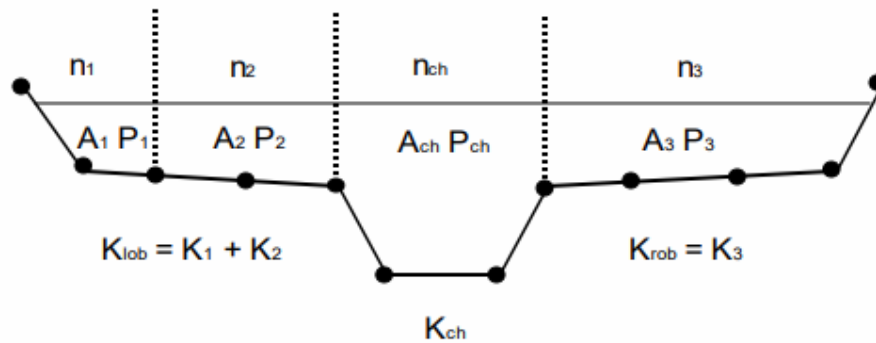


Рисунок 4.2- Визуализация метода расчёта.

$$Q = K S_f^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

$$K = \frac{1.486}{n} A R^{\frac{2}{3}} \quad (4.2)$$

K – модуль расчёта секции.

n – коэффициент шероховатости для секции.

A – площадь секции.

R - гидравлический радиус.

S_f - уклон между секциями.

4.2 Построение модели стока реки в HEC-RAS

Первым шагом для построения модели являлось экспортирование растрового снимка GMTED2010 с базой высотных данных в программный комплекс HEC-RAS. После этого с помощью встроенного в данный комплекс специального интерфейса для визуализации и обработки геокосмической информации RAS-MAPPER пользователь способен нанести на снимок,

использующийся в качестве картографической основы, необходимые геометрические объекты для определения расчётно -моделируемой зоны реки.

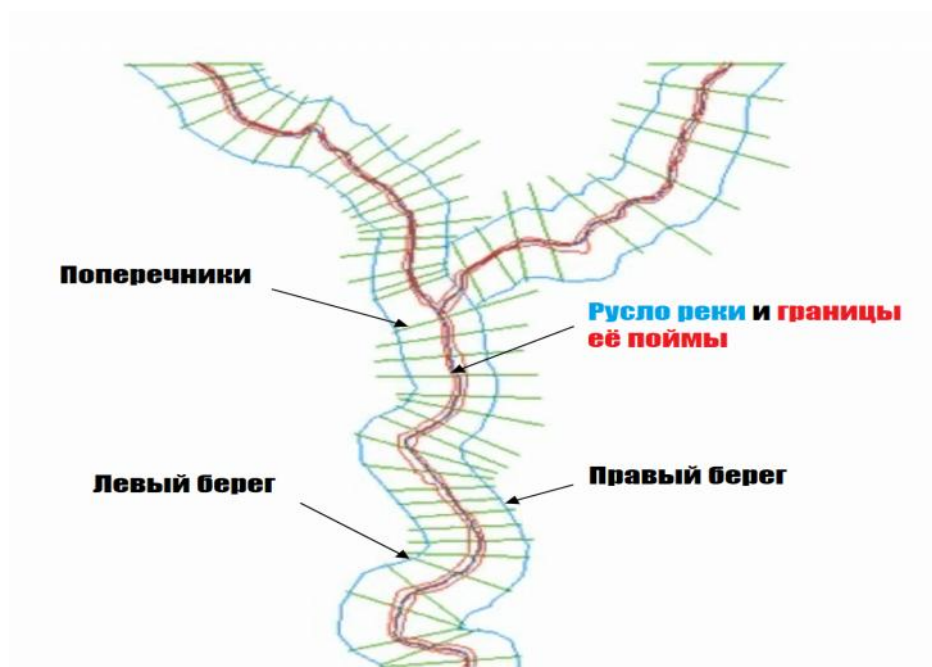


Рисунок 4.3 – Необходимые геометрические объекты для моделирования реки в HEC-RAS.

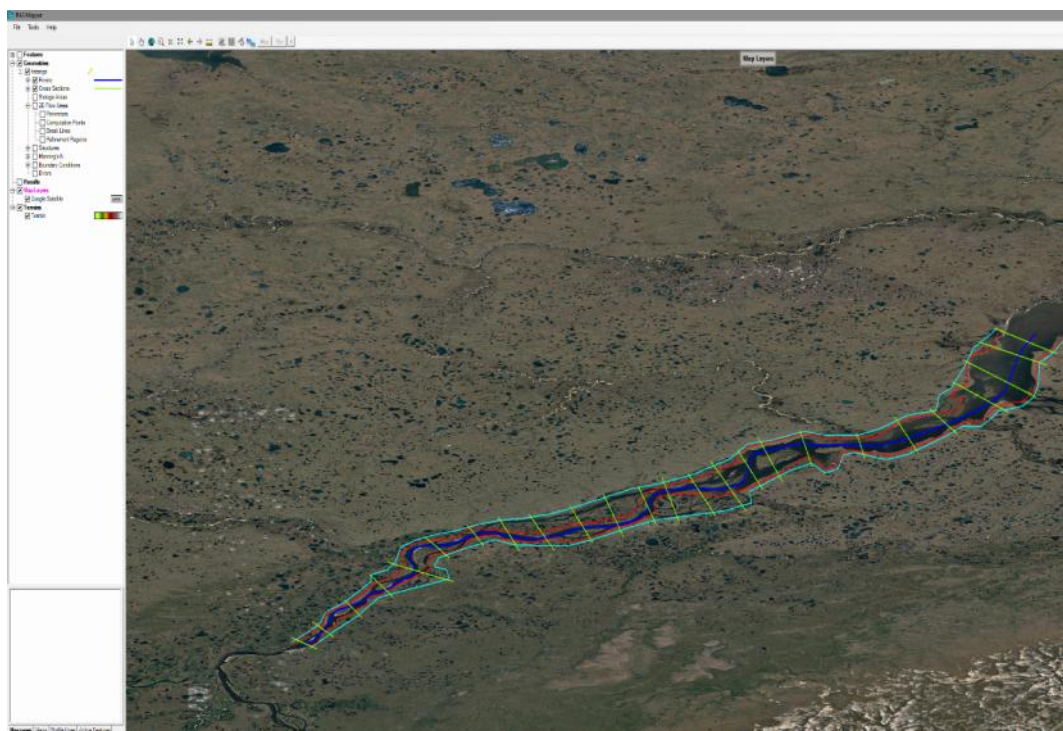


Рисунок 4.4 – Полный участок реки с нанесёнными границами мёртвых зон и границы поймы с построенными через каждые 3-5 км поперечными профилями.



Рисунок 4.5 – Расчётный участок реки.

На каждом поперечнике назначаются коэффициенты шероховатости Маннинга, а также коэффициенты потери энергии на сжатие и расширение потока в связи с изменением морфометрии русла.

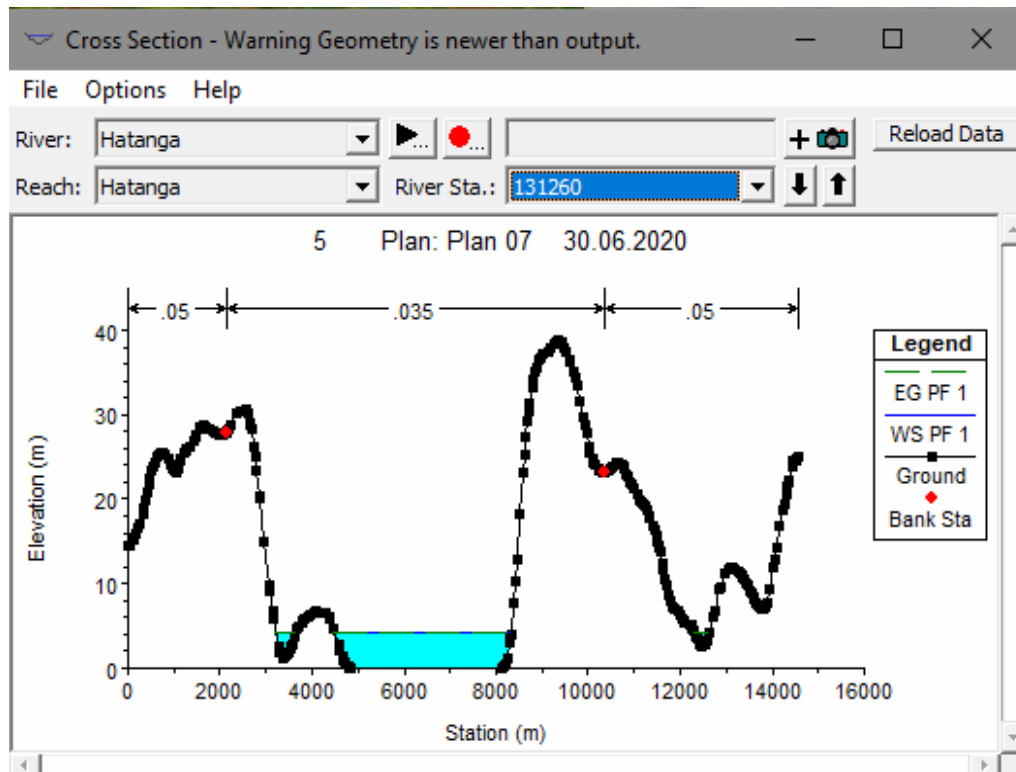


Рисунок 4.6 – Поперечный профиль у о. Чёрный с заданными коэффициентами шероховатости.

На выходе программа создаёт пространственную модель расчётного участка реки от п-ова Кресты до места впадения реки в Хатангский залив.

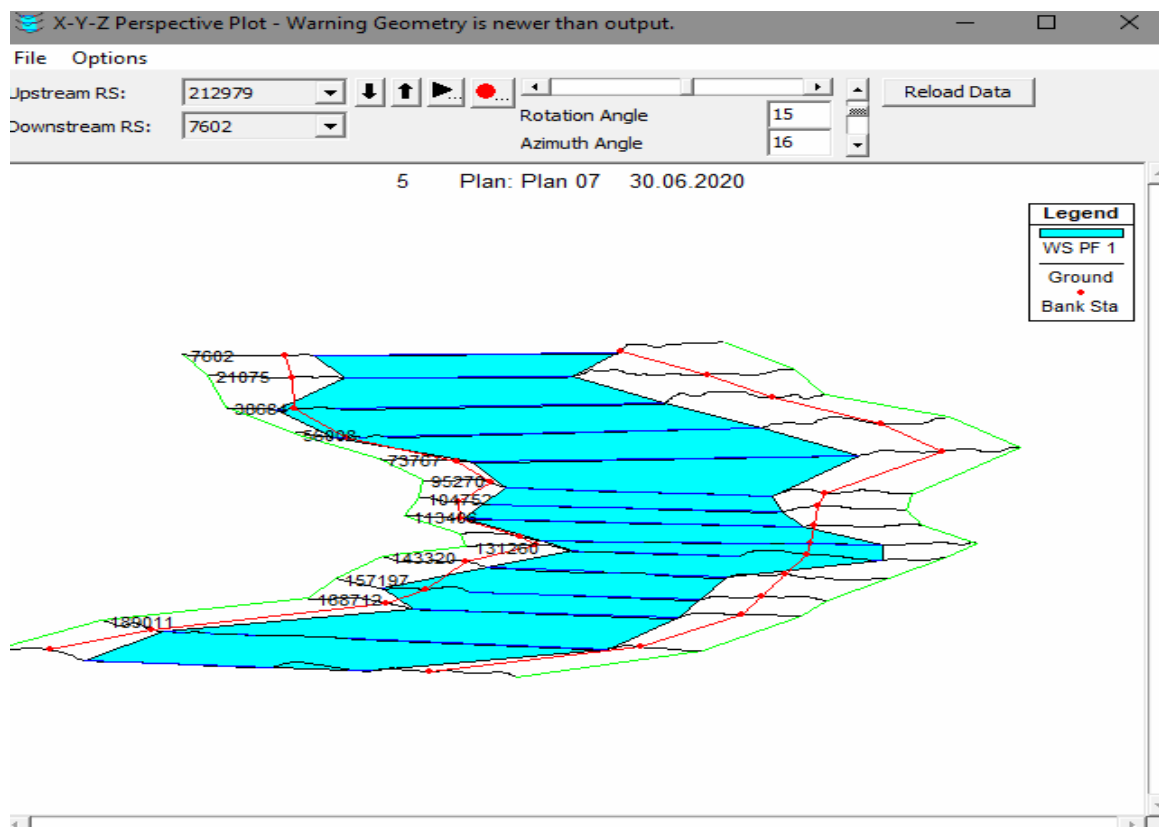


Рисунок 4.7 - Пространственная модель участка реки.

На пространственной модели уже можно моделировать сток, используя инструмент задания гидрографа через определённый интервал времени. Для наглядного моделирования сгонно-нагонной или паводочной волны был задан гидрограф близкий к средним реальным значениям расходов воды за летний период, изменяющимися с $7000 \text{ м}^3/\text{с}$ до $11000 \text{ м}^3/\text{с}$ за сутки.

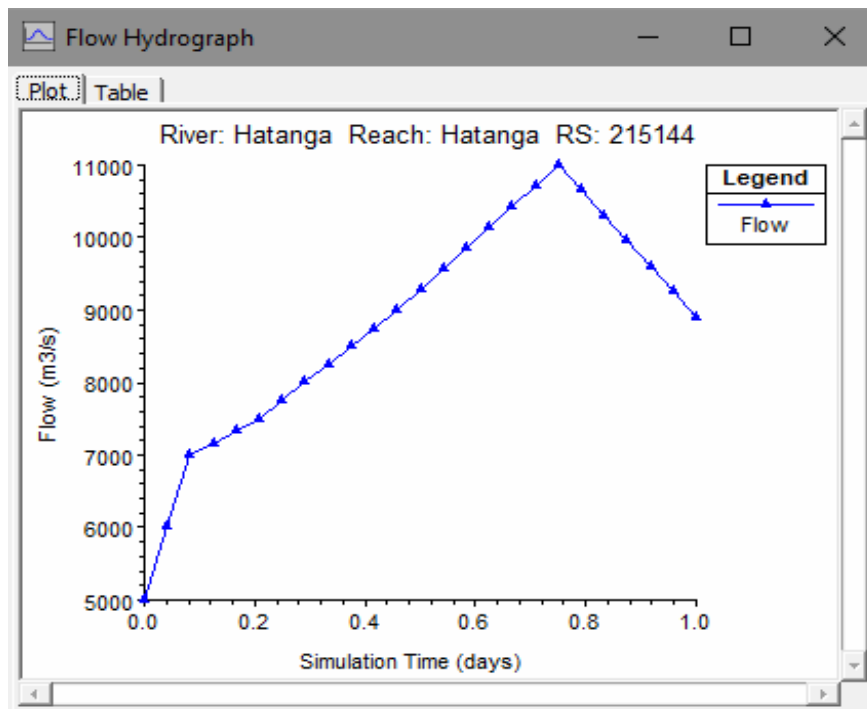


Рисунок 4.8 – Визуализация расчётного гидрографа.

На выходе программа визуализировала и рассчитала параметры сгонно-приливной волны на исследуемом участке устья реки при расходах 7000, 9000 и 11000 м³/с.

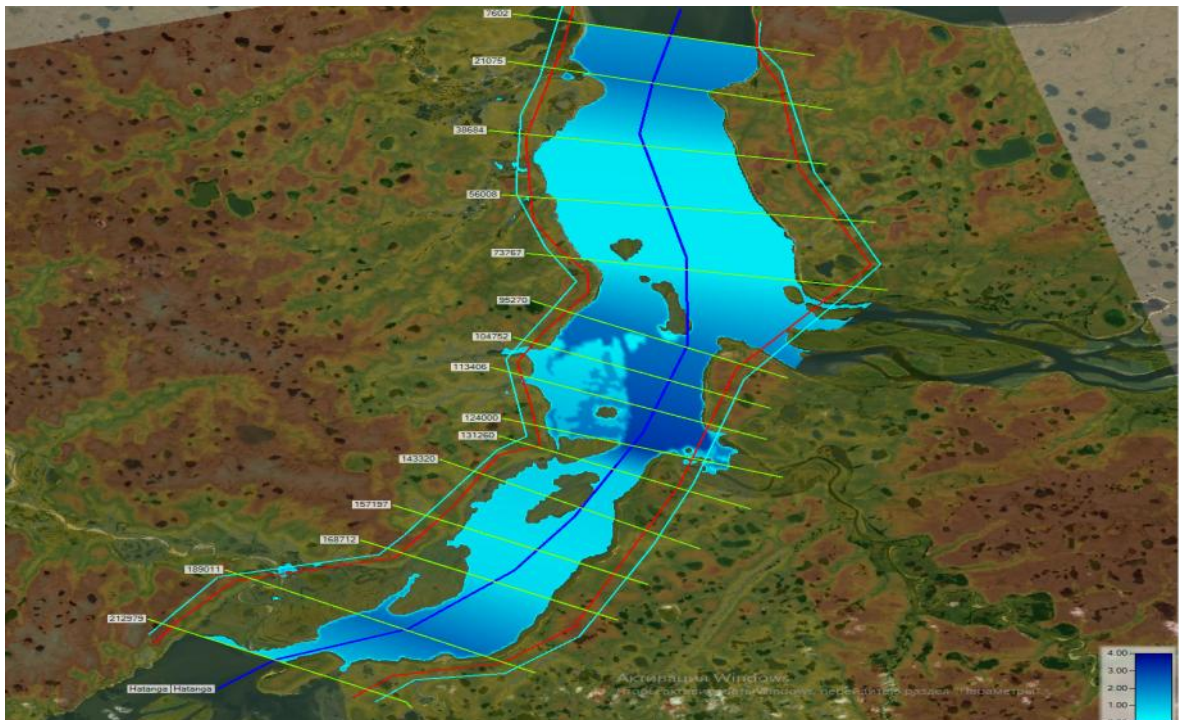


Рисунок 4.9 – План глубин и заполнения при расходе 7000 м³/с.



Рисунок 4.10 – План глубин и заполнения при расходе $9000 \text{ м}^3/\text{с}$.

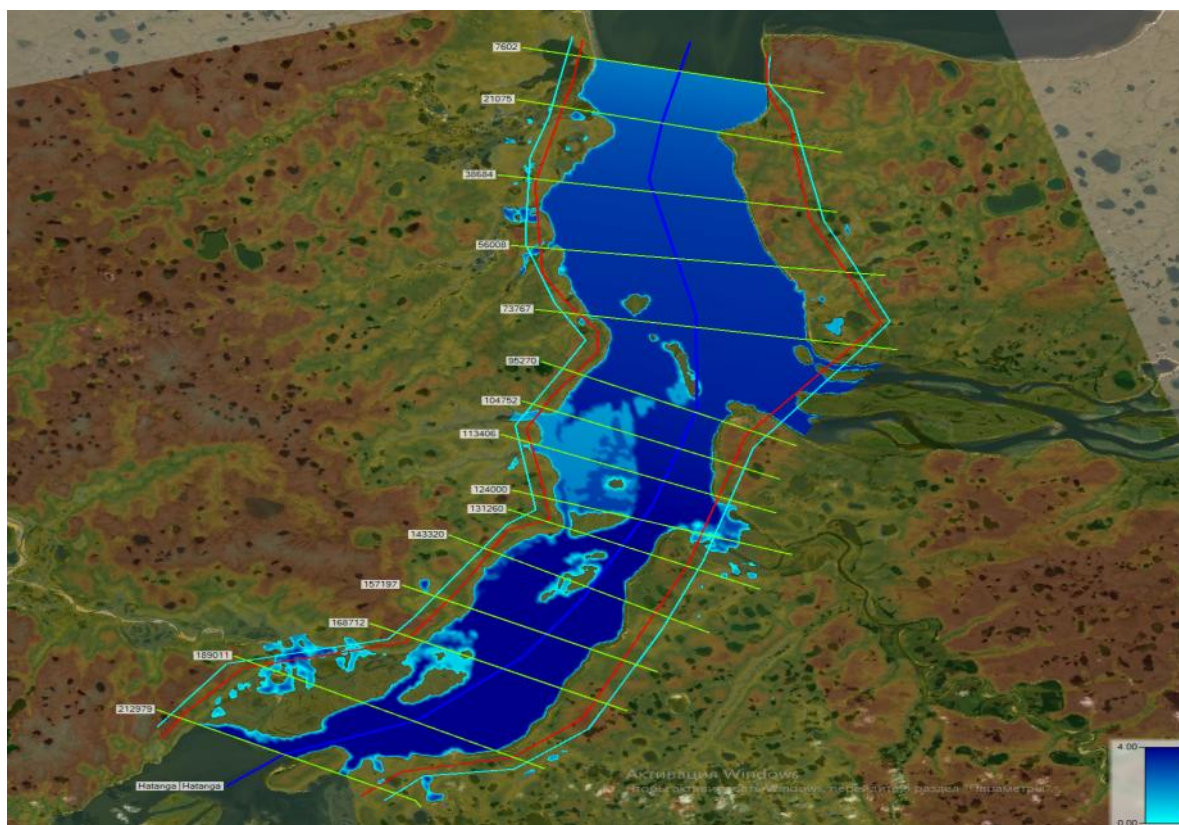


Рисунок 4.11 – План глубин и заполнения при расходе $11000 \text{ м}^3/\text{с}$.

Данные снимки модели дают нам отчётливо увидеть, что при расходе в $11000 \text{ м}^3/\text{с}$ острова находящиеся в русле реки уже начинают медленно затопливаться.

При создании плана затопления данный интерфейс также строит план поля скоростей на исследуемом участке реки.

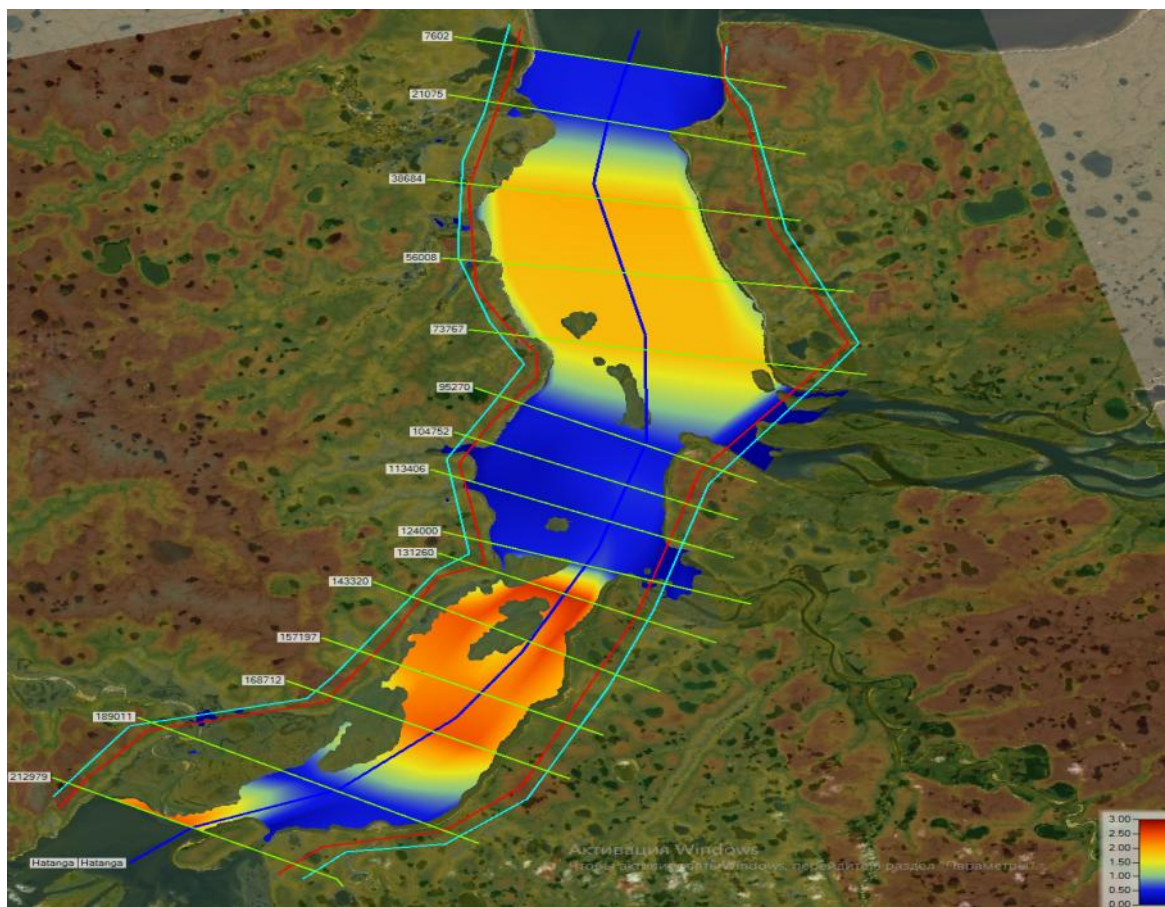


Рисунок 4.12 – Поле распределения скоростей на исследуемом участке реки.

Исходя из данной модели самые большие скорости на данном участке реки наблюдались в стрекне течения реки у о. Чёрный и достигали 2.7 м/с .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги проделанной работы можно сделать вывод, что с помощью глобальной модели высотных данных GMTED2010 и её аналогов, наподобие SRTM, NextMap, ASTERGDDEM и т.п., можно получить пригодные для решения гидрологических задач цифровые модели рек и рельефа с точностью от 1 до 40 м, которая зависит от типа модели высотных данных.

Построенная модель может позволить специалисту производить основные гидрологические расчёты, вроде определения площади водосбора водного объекта, направление линий тока воды, расчёт суммарного стока куда более быстрее аналогичной работы с топографическими картами, при этом даже не выезжая на объект исследований. Но для более точных задач, вроде гидротехнических и архитектурных, данная модель не подойдёт ввиду слишком большой погрешности в высоте. Это и было выявлено в ходе проделанной работы. В таких случаях необходим выезд специалистов для более детальной и точной съёмки местности или, по крайней мере, построение ЦМ на основе совмещённых топографических и батиметрических карт.

В ходе проделанной работы основные цели проекта были частично достигнуты: построена гидрографическая модель участка устьевой области р. Хатанга, построены карты глубин и полей распределения скоростей. На основе данной модели были изучены возможности программного комплекса HEC-RAS при решении гидрологических задач на основе различных геоинформационных технологий.

Данная работа делалась не столько построить точную цифровую модель для отображения особенностей гидрологического режима устьевой области реки Хатанга, сколько показать потенциал и возможности использования ЦМ в сфере гидрологии на данный момент времени. Учитывая тот факт, что технологический прогресс человечества не стоит на месте, а продолжает идти вперёд, можно с уверенностью сказать, что

развитие компьютерных технологий в будущем позволит цифровым моделям сильно увеличить своё применение и присутствие в гидрологической науке и, возможно, полностью заменить такие явления как “полевые работы”.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горкин А.П. География России: энциклопедический словарь. Москва.: Большая Российская энциклопедия, 1998.
2. Ресурсы поверхностных вод, том 17 (Лено-Индигирский район). 1977.
3. НЕС-RAS 5.0 ReferenceManual, 2012.
4. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек, 1998.

Ссылка на сайт с данными?