



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

Кафедра гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

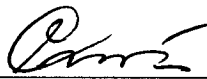
На тему **Расчет гидрографических
характеристик речных водосборов с
использованием GIS – технологий**

Исполнитель Полякова Александра Олеговна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К. Г. Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Тимофеева Лариса Александровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

К. Г. Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Сикан Александр Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

«28» июня 2016 г.

Санкт-Петербург
2016

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
1 Физико-географическая характеристика водосбора р. Ловать	6
1.1 Общие сведения	6
1.2 Геологическое строение и рельеф	6
1.3 Климатическая характеристика	9
1.4 Растительность	11
1.5 Гидрографическая сеть водосбора р. Ловать	12
2 Морфометрические характеристики рек и водосборов: традиционные и современные методы оценки	23
2.1 Традиционные методы оценки морфометрических характеристик рек и их водосборов	23
2.2 ГИС и ЦМР для определения морфометрических и гидрологических характеристик	27
2.3 Использование ГИС на территории исследования	34
3 Цифровая модель рельефа (SRTM-4) и ArcGIS ArcMAP 10.1 для оценки морфометрических характеристик водосбора р. Ловать	38
3.1 Цифровая модель рельефа SRTM	38
3.2 ArcGIS ArcMAP 10.1: модули ArcGIS Гидрология и ArcGIS Spatial Analyst	40
3.3 Вспомогательные инструменты	48
4 Обработка исходных данных и анализ полученных результатов	50
4.1 Исходные данные	50
4.2 Вычисление морфометрических характеристик	60
4.3 Анализ рассчитанных величин и их погрешностей	73
Заключение	77

ВВЕДЕНИЕ

Для определения стока рек – одной из главных расчетных гидрологических характеристик – в настоящее время существует большое количество методик. Успешность их применения зависит от наличия сведений о гидрографических и физико-географических характеристик исследуемой территории. До недавнего времени они определялись традиционными трудоемкими ручными измерениями на топографических картах.

Интенсивное развитие компьютерных и информационных технологий позволяет получать нужные характеристики посредством географических информационных систем (ГИС) в соответствии с современными требованиями.

Следовательно, возникает необходимость детального освоения инструментария, предлагаемого ГИС для определения морфометрических и физико-географических характеристик водотоков и их водосборов.

Интеграционный характер геоинформационных систем позволяет создать единое информационное пространство и мощный инструмент для сбора, хранения, систематизации, анализа и представления информации о состоянии водных объектов региона[1].

Целью данного дипломного проекта является оценка морфометрических характеристик водосбора р. Ловать посредством ГИС-технологий. Основное внимание уделено определению длины водотока, площади и средней высоты водосбора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выбор цифровой модели рельефа (ЦМР), соответствующей исследуемой территории;
2. Сбор данных по гидрологическим постам, расположенным на различных водотоках бассейна р. Ловать:(морфометрические характеристики, описание и координаты постов);

3. Освоение функций и инструментов ArcGIS 10.1 и её центрального приложения ArcMap10.1;

4. Определение морфометрических характеристик водотоков и их водосборов с помощью ЦМР и ArcGIS 10.1.

Бассейн р. Ловать был выбран в качестве исследуемой территории по причине хорошо развитой и достаточно изученной гидрографической сети. Река Ловать является трансграничным водным объектом, и западная часть водосбора р. Ловать находится в Белоруссии. Для исследования таких объектов использование ЦМР и ГИС открывает широкие перспективы, не ограничиваемые геополитическими границами.

Причиной выбора ЦМР SRTM (Shuttle radar topographic mission) стало то, что это готовая модель земной поверхности, которая не содержит растительного покрова, построек и гидрографической сети. Данные для создания ЦМР были получены в результате осуществления международной миссии по съемке поверхности Земли, выполненной в феврале 2000 г. с борта космического корабля многоразового использования с помощью радарной интерферометрической камеры и двух радиолокационных сенсоров [2].

Причиной выбора ArcGIS 10.1 послужило наличие в ее центральном приложении ArcMap 10.1 модуля **SpatialAnalyst, в котором содержатся инструменты гидрологического моделирования.** Инструменты группы Гидрология (Hydrology) используются для моделирования потока воды по поверхности. Гидрологические инструменты позволяют идентифицировать водоприемники, определять направление потока, вычислять суммарный сток, разграничивать водосборы водоразделами и создавать сети водотоков [3].

ГИС-технологии и спутниковые данные применяются в различных областях прикладной гидрологии: дистанционный мониторинг прорывоопасных озер, исследование процессов снеготаяния, моделирование зон затопления, управление водными ресурсами и т.д.

1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОСБОРА Р. ЛОВАТЬ

1.1 Общие сведения

Ловатьрека в Витебской области Белоруссии, Псковской и Новгородской областях России. Длина 530 км, площадь бассейна 21,9 тыс. км². Принадлежит к бассейну Балтийского моря. На реке расположены города Великие Луки, Холм и посёлок городского типа Парфино.

Река вытекает из озера Ловатец (координаты истока 55°50'51" с.ш. и 30°17'41" в.д.) вблизи границы России и Белоруссии, впадает в озеро Ильмень (длина 45 км, ширина 35 км, площадь водосбора 67 200 км²), образуя вместе с рекой Пола дельту площадью около 400 км². От истока до поселка Межа (Витебская область) река Ловать течет на юго-восток, далее резко меняет направление и течет на север, сильно отклоняясь то влево, то вправо. Крупные притоки: Насва, Локня, Редья, Полисть, Кунья. Самый крупный приток — Кунья впадает в Ловать в черте г. Холм.

Относится к типично равнинным рекам малой водности, со слабой скоростью течения и преимущественно низкими, заболоченными берегами. Сплавная река (490 км). В низовье (70 км) Ловать судоходна.

Питание реки смешанное с преобладанием снегового. В связи с этим годовой расход воды неравномерный: весной, со второй половины марта по май включительно, проходит около 55% годового стока; с июня по октябрь — около 23% и зимой, с ноября по начало марта — около 22% годового стока.

1.2 Геологическое строение и рельеф

В пределах Белоруссии, в верховье, река Ловать протекает по Городокской возвышенности. Площадь возвышенности около 3000 км². Высоты колеблются от 135 м до 263 м. Поверхность возвышенности представляет собой систему конечно-моренных гряд, которые разделены ложбинами и котловинами. Почвы дерново-подзолистые, дерново-подзолистые заболоченные, торфяно-болотные или пойменные. Болота верховые и переходные.

В Псковской области, в среднем течении, река Ловать течет по Великолукским грядам. Поднятия гряд составляет около 140-160 метров. Они расположены между Валдайской и Бежаницкой возвышенностями к югу от города Великие Луки. Далее река течет по Ловатской низине, которая входит в состав обширной Приильменской низменности. Приильменная низменность достаточно ровная. Высоты меняются от 18 до 50 м над уровнем моря. Более понижена её центральная часть возле озера Ильмень. На Приильменной низменности преобладают дерново-аллювиальные подзолисто-болотные и болотные почвы, к образованию которых приводит переувлажнение [4].



Рисунок 1.1 Карта-схема водосбора р. Ловать

В связи с неравномерным вскрытием Ловати и ее притоков происходит подпор воды, Ловать выходит из берегов и затопляет пойму и устьевые участки притоков Насвы, Лазо-вицы, Вскуницы. Особенно сильные разливы рек бывают на участке от г. Великие Луки до деревни Марьино [5].

В результате разливов рек пойменные участки их долин ежегодно обогащаются илистым материалом. Поэтому на затопляемых участках формируются ценные в хозяйственном отношении дерново-аллювиальные почвы и заливные луга, дающие высокие урожаи хорошего сена.

В окрестностях Великих Лук и у деревни Гаписово имеются сероводородные источники. Их выходы связаны с восстановлением гипса, линзы которого находятся в пестроцветной толще верхнего девона. Эти минеральные источники имеют большое целебное значение.

Наличие прямолинейных участков, а также резкие изломы плановых очертаний русла Ловати и ее притоков, видимо, свидетельствуют о приуроченности их к новейшим тектоническим разломам. Наиболее древними являются поймы верхнего течения, переходящие затем в надпойменные террасы, относительная высота которых возрастает вниз по течению реки. Представляется, что некоторые из положений, приведенных авторами, являются далеко не бесспорными. В частности, следует учесть, что кристаллический фундамент здесь находится на глубинах 1-1.5 тыс. м, а расстояние между поперечными профилями с замерами террас часто слишком велики.

1.3 Климатическая характеристика

Климат территории водосбора р.Ловать— умеренно-континентальный, влажный, смягченный сравнительной близостью Атлантического океана. Последнее обстоятельство определяет расположение водосбора на границе зоны переходного климата — от морского к континентальному. Такое “пограничное” расположение обуславливает неустойчивый характер погоды во все сезоны года. Здесь хорошо заметны некоторые черты морского климата: влажное, умеренно теплое лето, сравнительно мягкая зима. Величина радиационного баланса составляет около 40 ккал на 1 см² в год. Относительно большая облачность в течение года значительно уменьшает продолжительность солнечного сияния, которое составляет в среднем около 1700 часов в год (т. е. около 40 % от возможной продолжительности за этот период для данных широт). На севере водосбора солнечного сияния почти на 10 % больше, чем на юге области. Осенью и зимой преобладают южные и юго-западные ветры, летом — западные, северо-западные и юго-западные. Средняя скорость ветра невелика — 3,5 — 4,0 м/сек

Важным климатообразующим фактором является подстилающая поверхность, которая оказывает влияние на скорость ветра, влажность и температуру воздуха, распределение осадков. Поверхность водосбора не однородна: здесь встречаются крупные низменности и возвышенности, множество больших и малых озер, обширные болота и лесные массивы, луга и пашни — все это обуславливает климатические различия в пределах водосбора. Так, возвышенностям, по сравнению с низменностями, свойственны пониженные температуры, более короткий безморозный период, повышенное количество осадков, большая высота и длительность залегания снежного покрова, большие скорости ветра и т.д. Озера и болота, особенно крупные, оказывают существенное влияние на микроклимат прилегающих территорий.

Приток солнечного тепла и господствующие воздушные массы определяют годовое изменение температуры воздуха. Зимой поступление тепла

резко уменьшается, но благодаря частому вторжению воздушных масс с Атлантики зима здесь сравнительно мягкая. Низкие температуры зимой связаны с вторжением континентального арктического воздуха и достигают -46°C . Снеготаяние начинается в марте, в первых числах апреля устанавливаются положительные среднесуточные температуры. Летом облачность значительно снижает приток солнечного тепла. Высокие температуры наблюдаются при антициклонах, они могут достигать $+32^{\circ}\text{C}$. Среднесуточная отрицательная температура воздуха устанавливается в середине ноября. Наглядное представление о годовом ходе температуры воздуха на рассматриваемой территории дают сведения, приведенные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Среднемесячная температура воздуха

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
г. Холм	-7.2	- 7.2	- 3.4	4.0	11.0	15.0	17.5	15.4	10.8	5.0	- 0.4	- 5.0	4.6
г.В.Луки	-7.6	- 7.1	- 3.0	4.6	11.9	15.4	17.7	15.7	10.8	5.1	- 0.7	- 5.6	4.8

Осадков на водосборе в среднем за год выпадает 650 – 750 мм. Большая часть осадков приносится влажным атлантическим воздухом. В летнее время осадки также образуются за счет испарения влаги с поверхности многочисленных рек и озер. Количество осадков возрастает с запада на восток, что объясняется характером рельефа. На возвышенностях выпадает больше осадков, чем на равнинах (800 мм и 650 мм соответственно). Годовое количество осадков превышает возможное испарение на 200–250 мм, что, в сочетании с благоприятными условиями для формирования стока, обуславливает высокую густоту речной сети [6].

1.4 Растительность

Рассматриваемая территория находится в умеренных широтах Северного полушария, в подзоне смешанных лесов. Растительность здесь сформировалась после отступления Валдайского ледника. На формирование растительного покрова оказала влияние деятельность человека – вырубка леса, распашка естественных угодий, мелиорация. В настоящее время воздействие человека является одним из главных факторов, определяющих характер растительности. Господствующим типом естественной растительности являются леса, ими занято около 30% территории. Большая часть лесов представлена сосняками. Лиственные леса представлены березняками, осинниками, ольшаниками, реже дубравами. В южной части водосбора распространены суходольные, низинные и пойменные луга. Болота и заболоченные территории занимают 16% водосбора. На болотах много клюквы, морошки, голубики, черники, в сухих местах – малина, земляника, брусника, ежевика. Деревья на болотах растут редко, они низкорослые и представлены сосной и березой

1.5 Гидрографическая сеть водосбора р. Ловать

Сложный рельеф и избыточная увлажненность территории обусловили обилие рек, озер и болот. Густота речной сети составляет 0,20 – 0,36 км русел рек на каждый квадратный километр поверхности, что является высоким показателем. Реки территории относятся к бассейну Балтийского моря. Для них характерно смешанное питание, причем на долю талых снеговых вод приходится около 50 % годового стока, дождевых и подземных – примерно по 25 %. Основная масса воды поступает в реки весной, во время таяния снега, формируя весеннее половодье, во время которого уровень воды может повышаться на 1 – 6 метров. Величина годового стока рек во многом зависит от особенностей рельефа местности, увеличиваясь на возвышенностях и уменьшаясь в низменностях почти от 300 до 200 миллиметров слоя.

Большая часть речных долин образовалась в послеледниковое время и выглядит сравнительно молодо. Их средний возраст – около 9 тысяч лет. Реки еще не успели выработать глубоких и широких долин. Глубина вреза крупных рек достигает 25 метров. В южной части водосбора находятся многочисленные, сравнительно крупные озера с неровным дном, высокими извилистыми берегами и глубинами до 30 метров. Особенно много их встречается на заливных равнинах (в Себежском, Невельском, Куньинском районах), а также на холмисто-моренных возвышенностях (Бежаницкой, Судомской). В условиях равнинного рельефа чаще всего встречаются небольшие мелководные озера с низкими, плоскими, заболоченными берегами, ровным илистым дном и глубинами до 4 метров. Болота распределены по территории неравномерно. Болота, особенно верховые, являются регуляторами стока рек.

В целом рассматриваемая территория богата грунтовыми и артезианскими водами, чему способствует ее избыточное увлажнение. Грунтовые воды, как правило, располагаются неглубоко. На равнинах и

в котловинах между холмами они могут местами выходить на поверхность, соединяясь с болотными водами, или пробиваться в виде источников (ключей, родников). Глубина залегания грунтовых вод во многом зависит от рельефа местности. В условиях озерно-ледниковых равнин глубина их залегания колеблется в пределах 1 – 3 метров. На юге водосбора, где преобладают зандровые равнины, они залегают на глубине от 1 до 10 метров, а на холмисто-моренных участках от 5 до 30 метров. Так как грунтовые воды питаются, в основном, за счет атмосферных осадков, их уровень повышается весной и осенью в период таяния снега и обильных дождей и снижается летом и зимой.

В верховьях Ловать проходит через несколько озёр: Завесно, Задратье, Межа, Сосно, Чернявское (Чернясто), Сесито, Цаство. В пределах Белоруссии протекает по Городокской возвышенности. Пойма реки луговая, во многих местах заболочена. Ширина реки в верховье 10—15 м. После впадения Насвы русло Ловати проходит по лесистой местности. Берега высокие и в некоторых местах обрывисты (п. Селеево). В среднем течении реки много перекатов и порогов. Основные сосредоточены в районе впадения Локни и ниже города Холм. В этом месте ширина реки достигает 50—60 метров, а после впадения Куньи — более 100 метров. На Приильменской низменности берега Ловати в основном пологие. В 22 км от устья она соединяется протокой с Полгой. Весной пойменные луга, расположенные в дельте этих рек, затопляются на глубину 2—3 метра.

Значительная заболоченность территории способствует поступлению в реки большого количества органического вещества окисляющегося в воде, вследствие чего вода имеет желто-бурую окраску. Содержание кислорода в водах рек в течение года велико: от 50 до 98 % насыщения.

2 МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕК И ИХ ВОДОСБОРОВ: ТРАДИЦИОННЫЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ

2.1 Традиционные методы оценки морфометрических характеристик рек и их водосборов

Морфометрические (гидрографические) характеристики речных водосборов (площадь водосбора, средняя ширина, высота, залесенность, заболоченность, озерность, длина реки, ее уклон и др.) имеют важное значение для понимания и объяснения особенностей режима рек; они широко используются в практике гидрологических расчетов в качестве основных параметров многих расчетных формул. Однако, не существует источника, в котором бы содержались все морфометрические данные о реке и ее водосборе, необходимые для оценки условий формирования речного стока. Зачастую, приводимые в гидрологической литературе данные несопоставимы между собой, поскольку они получены по разным исходным материалам и различными методами. Более того, многие данные на настоящий момент являются объективно устаревшими, поскольку за прошедшее с момента их публикации время произошли существенные изменения, например, в характере землепользования. Значительные трудности вызывает решение, казалось бы, тривиальной задачи поиска схемы водосбора в определенном масштабе. Подготовленный в 1950-1954 гг. “Альбом гидрографических характеристик речных бассейнов европейской территории СССР”, содержащий данные об основных морфометрических характеристиках более 600 бассейнов, расположенных, в основном, в центральной части ЕТР, остается уникальным изданием. Помимо общепринятых данных, Альбом содержит географические координаты пунктов (створов) и схемы водосборов. Данные приведены для гидрометрических створов, на которых продолжительность наблюдений за стоком превышает 5 лет, а площадь водосбора более 1000 км² [7].

Территория земной поверхности и толща почво - грунтов, с которых данная речная система или отдельная река получает водное питания, называется водосборным бассейном (водосбором) речной системы или реки. Поверхностный водосбор каждой реки отделяется от водосбора соседней реки водоразделом, который проходит через самые высокие точки земной поверхности, расположенной между ними. В общем случае поверхностный и подземный водоразделы не совпадают. Поскольку определить границы подземного водосбора зачастую невозможно, при расчетах и анализе формирования стока за величину бассейна принимают только величину поверхностного водосбора.

Каждая река и ее водосбор могут быть охарактеризованы количественными показателями – морфометрическими характеристиками. Среди них основными являются: длина реки, площадь, форма, высота и уклон водосбора. Традиционно, определение всех указанных морфометрических характеристик выполнялось по крупномасштабным топографическим картам, реже – по данным аэрофотосъемки или полевых исследований. Масштаб карты должен соответствовать размерам исследуемых объектов, кроме того, карты одного масштаба должны покрывать весь водосбор, они должны быть новыми, в хорошем состоянии, содержать сведения о рельефе и о гидрографической сети. Площадь водосбора определяется по карте с помощью палетки, планиметра или соответствующих компьютерных программ. Площади малых водосборов должны определяться по картам такого масштаба, при котором они занимают не менее 5 см². Линии водоразделов проводятся, начиная от устьев замыкающих створов рек и далее по линиям хребтов и вершинам возвышенностей. На практике построение линии водораздела часто превращается в нетривиальную задачу, особенно на территориях с невыраженным изменением высот, при наличии болот, систем каналов.

Длина реки(L) – это расстояние по реке от устья до истока. Длина реки, как правило, определяется измерителем по картам крупного масштаба с учетом поправочного коэффициента на извилистость.

Исследованием взаимосвязи морфометрических характеристик занимались Г.А. Алексеев, Ю.М. Георгиевский, Р.А. Нежиховский, А.А. Соколов, Д.Л. Соколовский. В общем виде соотношения между ними могут быть представлены следующими уравнениями:

$$F = kL^b ; \quad B = dF^{n_1} ; \quad L = cF^{n_2} ; \quad I = a/(F + 1)^m , \quad (2.6)$$

где F – площадь водосбора, км²; B – ширина (средняя) водосбора, км; L – длина главной реки, км; I – уклон (средний или средневзвешенный) реки, промилле; b , n , m – районные параметры, изменяются в зависимости от географического района, размера реки, количества данных и масштаба карты, по которой определялись морфометрические характеристики.

Морфометрические характеристики являются условными факторами, используемыми при анализе формирования стока и разработке методов его расчета. Питание реки, при прочих равных условиях, зависит от размера принимающей осадки площади водосбора. Чем длиннее река и больше уклоны местности, тем глубже эрозионный врез русла, а значит и подземное питание. Питание реки увеличивается также с увеличением количества притоков, то есть с увеличением густоты речной сети. Таким образом, все основные морфометрические характеристики водосбора взаимосвязаны и могут быть выражены через площадь водосбора. Это положение играет важную роль при оценке стока с неизученных и недостаточно изученных малых водосборов [8].

Традиционные методы оценки морфометрические характеристики рек и их водосборов постепенно уступают позиции современным технологиям, основанным на применении геоинформационных систем и данных дистанционного зондирования Земли.

2.2 ГИС и ЦМР для определения морфометрических и гидрологических характеристик

Дэвид Райном в 1988 г. ввел следующее определение ГИС (геоинформационной системы) – это «компьютерная система для сбора, проверки, интеграции и анализа информации, относящейся к земной поверхности».

Первая в мире ГИС была создана в начале 1960-х гг. для Министерства лесного и сельского развития Канады. Ее задачей была классификация и нанесение на карту земельных ресурсов Канады; она была направлена на успешное создание планов управления природными ресурсами. Сегодня существует все более растущее понимание необходимости широкомасштабных операций по оцифровке и компьютеризации традиционно «ручных» задач. Спектр возможных применений ГИС практически неограничен, а число и разнообразие пользователей ГИС возрастает по экспоненте.

Этот рост показывает, что ГИС является мощной надежной технологией. Современные геоинформационные системы расширили использование карт через замену их большим числом цифровых картографических слоев с взаимосвязанными темами. Эти слои могут быть автоматически проанализированы, а их тематическое наполнение – объединено для получения осмысленных ответов, необходимых специалистам, принимающим решения. ГИС изменяют способы сбора и накопления географических данных способы работы с картами, характер восприятия географической информации. Задачи, решение которых было невозможно при помощи обычных карт, теперь могут быть выполнены [9].

К подсистемам ГИС относятся:

1. Подсистема сбора информации, осуществляющая сбор и предварительную обработку данных из различных источников (отвечает за преобразование различных типов пространственных данных).

2. Подсистема хранения и выборки данных, организующая пространственные данные с целью их выборки, обновления и редактирования.

3. Подсистема манипуляции данными и анализа, которая выполняет различные задачи на основе этих данных, группирует и разделяет их, устанавливает параметры и ограничения и выполняет моделирующие функции.

4. Подсистема вывода, которая отображает всю базу данных или часть ее в табличной, диаграммной или картографической форме.

Первая подсистема ГИС соответствует первому и второму шагу процесса картографирования – сбору данных и компиляции карты. В традиционной технологии картограф наносит на бумажную карту точки, линии и области, а ее компьютерный аналог использует специальные устройства для записи или кодирования точек, линий и областей в компьютерную систему. При этом источники данных для ГИС помимо традиционных включают широкий спектр цифровых источников.

Для второй подсистемы ГИС, подсистемы хранения и выборки информации, нет прямого соответствия в картографическом методе. Традиционная карта сама является средством хранения и выборки информации. В ГИС подсистема выборки и хранения позволяет делать запросы, возвращающие только нужную, контекстно-связанную информацию. Подсистема хранит геометрические координаты точечных, линейных и площадных геометрических объектов и связанные с ними характеристики (атрибуты).

В картографическом методе нет прямого аналога и для подсистемы анализа, за исключением того, что карта является фундаментальным инструментом анализа пространственно-связанных данных. При этом требуются специальные инструменты анализа – линейка, транспортир, планиметр и т.д. Подсистема анализа является «сердцем» ГИС. Она использует потенциал современных компьютеров для измерения, сравнения, описания информации, хранящейся в базе данных, которые дают быстрый доступ к

исходным данным и позволяют агрегировать и классифицировать данные для дальнейшего анализа.

Производство и тиражирование карт является двумя конечными этапами в картографическом методе. В компьютерной картографии выходной продукт в целом тот же – карта. Но ГИС способны представлять результаты анализа также в виде таблиц, гистограмм, графиков, диаграмм, фотографий и т.д. [10].

Метод картографического отображения в гидрологии начал применяться еще в первой половине прошлого века. Этот метод подразумевает создание и использование карт, отражающих пространственное распределение гидрологических характеристик. Однако это направление не нашло достаточно широкого распространения по причине трудоемкости картографических работ, которые до недавних пор традиционно выполнялись вручную. С развитием компьютерных технологий обработки пространственных данных это направление вновь обрело популярность в гидрологии. ГИС-технология привлекательна не только из-за скорости и точности выполнения картометрических работ и гидрологических расчетов; она способна исключать случайные ошибки измерений и позволяет представлять результаты в наглядной и легко воспринимаемой форме.

Все большее применение для решения прикладных задач находит сочетание ГИС-технологий и цифровых моделей рельефа (ЦМР), в частности, при морфометрическом анализе рельефа местности [11-13]. ЦМР – цифровое картографическое представление высот поверхности Земли в узлах регулярной сетки в направлениях x и y , вертикальное значение которого геопривязано к общему вертикальному датуму [14]. Для решения конкретных задач часто используются ЦМР, построенные по данным высотной съемки 2000 г по программе Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM).

Точность является одной из важнейших характеристик качества модели, которая может быть оценена ее соответствием оригиналу. Это соответствие или точность ЦМР определяется по выборочным оценкам среднеквадратичных

погрешностей значений высот. Точность ЦМР обуславливают следующие факторы – характер источника и точность исходных данных, технология преобразования данных, точность восстановления функции высоты при преобразовании множеств исходных данных, полученных оцифровкой изогипс в их регулярный набор (например, точность процедур интерполяции), тип и параметры модели данных, используемой при создании ЦМР (например, заданного пространственного разрешения).

Пространственная точность ЦМР, полученных оцифровкой топографических карт масштабов 1:200000, 1:100000 и 1:50000, неоднократно проверялась. М. Хатчинсон [15] показал, что погрешности высотных значений на ЦМР зависят от пространственного разрешения и топографии местности, т.е. с увеличением размера грид ячейки и в районах с более расчлененным рельефом погрешность ЦМР увеличивается.

Это положение, в частности, подтверждают результаты исследования, выполненного армянскими специалистами на территории, характеризующейся разнообразием форм рельефа: наличием как высокогорья с высокой степенью расчлененности рельефа, так и равнинных участков. Сравнительный анализ значений высот, уклонов, экспозиций склонов, полученных по ЦМР, построенным на основании топографических карт различного масштаба и соответствующих значений, полученных с помощью ЦМР SRTM показал, что наиболее близкими к SRTM значениями являются цифровые модели высот, уклонов и экспозиций, полученные с топокарт масштаба 1:100000. Этот факт дает основание считать, что данные SRTM можно использовать для геологического и геоморфологического картирования масштаба 1:100000. Наибольшее отклонение от ЦМР SRTM (стандартное отклонение – 43 м) имели значения ЦМР топокарт 1:200000, а стандартное отклонение ЦМР топокарт 1:50000 составило 30 м [16].

По оценкам А.К. Корвэула и И. Эвиака [17] матрица SRTM имеет ошибку, которая в среднем составляет для равнинной территории 2,9 м и 5,4 м

для холмистой местности, значительная часть этих данных включает систематическую ошибку. Согласно их выводам, матрица SRTM подходит для создания контурных линий горизонталей на топографических картах масштаба 1:50000 и мельче.

Опыт применения средств географических информационных систем для измерения морфометрических параметров речных бассейнов и определения некоторых гидрологических характеристик водных объектов весьма позитивный. Так, на примере исследования водосбора Вилуйского водохранилища, показано, что полученные посредством ГИС (с использованием цифровой модели Hydrolk) значения площадей водосборов различных размеров (от 37 до 136000 км²) хорошо соответствуют данным, опубликованным в “Ресурсах поверхностных вод СССР”. Посредством Hydrolk возможно определить границы водосборов до створов гидрологических постов, средние высоты и координаты центров тяжести водосборов [18] При этом затраты времени существенно сокращаются, что позволяет обрабатывать большие объемы данных [19].

Лидирующей компанией России в области разработки программно-информационных продуктов для инженерной гидрологии, основанных на современных ГИС-технологиях является НПО «Гидротехнологии». Основной продукт фирмы – программный комплекс «Гидрорасчеты» успешно работает более чем в 130 проектных и других организациях России и ближнего зарубежья и позволяет существенно ускорить процесс определения расчетных гидрологических характеристик, повысить качество работ и унифицировать представление результатов. В настоящее время комплекс «Гидрорасчеты» дополнен ГИС-модулем, позволяющим представить 7500 пунктов наблюдений на электронной карте России и осуществить интерфейс между картой и многолетними рядами основных гидрологических характеристик, представленных в 26 региональных базах данных. Для определения расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений

разработан новый программно-информационный продукт "Гидрологическая ГИС России", реализующий как стандартные функции ГИС (создание и редактирование геоинформационных слоев, работа с растром и другие), так и расчеты при отсутствии данных методами интерполяции и гидрологической аналогии. В информационную часть "Гидрологической ГИС России" входят базовая электронная карта России масштаба 1:1 000 000, специализированные слои координат центров тяжести водосборов и пунктов наблюдений для 26 гидрологических районов. Ведется разработка новых методов и моделей для отдельных регионов России. В программно-информационных продуктах реализованы как методы, приведенные в основных нормативных документах (СП 33-101-2003, ВСН 163-83 и другие), так и новые методы и модели, разработанные высококвалифицированными специалистами фирмы [20]. Несмотря на широкие возможности данного продукта, для достижения цели проекта он не может быть применен ввиду несоответствия масштаба его картографической основы и размеров исследуемых объектов. Кроме того, карты представлены в формате MapInfo, не поддерживающем спутниковые данные. Однако базы гидрометеорологических данных НПО "Гидротехнологии", содержащие метаданные гидрологических постов и водосборов до замыкающего створа (коды ГВК, координаты, площади водосбора, расстояние от истока и устья, даты открытия и закрытия и т.д.) и многолетнюю информацию по 7500 пунктам наблюдений на территории России, безусловно, ценны.

Современные тенденции рынка технических средств показывают, что ГИС – стремительно развивающаяся отрасль промышленности. ГИС – наиболее подходящий вид информационных систем в области природопользования и охраны окружающей среды. Это положение особенно актуально для нашей страны, которая обладает огромной территорией и богатыми природными ресурсами. В управлении природными ресурсами ключевую роль играет пространственный аспект. И сама по себе окружающая среда – не что иное, как

пространственное распределение различных явлений и объектов. В настоящее время интеграция технологий ведения баз данных, ГИС и обработки изображений достигла весьма высокой степени, что позволяет ГИС автоматизировать все функции по работе с данными о природных ресурсах. Можно выделить несколько крупных блоков применения ГИС для управления природными ресурсами:

- 1) инвентаризация и учет;
- 2) мониторинг;
- 3) аналитический блок;
- 4) подготовка карт и отчетной документации [21].

2.3 Использование ГИС на территории исследования

В настоящее время в регионе функционирует ряд организаций, занимающихся контролем, управлением, мониторингом водных ресурсов водосборного бассейна. К ключевым организациям относятся:

- Отдел водных ресурсов по Псковской области Федерального агентства водных ресурсов при МПР РФ;
- ФГУ «Псководхоз» при Федеральном агентстве водных ресурсов;
- Комитет лицензирования и природопользования по Псковской области;
- Псковский центр гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Гидромет);
- Псковское отделение Государственного научного института озерного и речного хозяйства (ГосНИОРХ).

В уставе многих организаций обозначен вопрос информационного обмена и кооперации с другими организациями в регионе. Организации понимают важность доступности информации и теоретически готовы к расширению информационной сети в регионе. Все ключевые водопользователи в регионе знают о существовании ГИС- технологий, а многие имеют представление о том, как функционируют ГИС-системы. И у тех, и у других интерес к использованию ГИС-технологий велик. К тому же многие организации обязаны использовать ГИС в обработке и хранении данных. Многие приобрели программное обеспечение (Arc GIS ArcView) и имеют персонал, готовый приступить к работе с ГИС. В рамках ряда проектов, прошедших в регионе в последние годы, были проведены несколько ГИС-тренингов. В результате этого некоторые специалисты получили начальные представления о геоинформационных системах (было использовано программное обеспечение ArcGIS ArcView – как наиболее популярное в бассейне и достаточно

эффективное в работе). В результате предварительных консультаций и бесед с профессионалами был выделен ряд проблем, препятствующих широкому внедрению ГИС-технологий в организации, занимающиеся управлением водными ресурсами в водосборном бассейне Чудского озера (в Псковской обл.). Основными проблемами остается отсутствие опыта работы с ГИС у персонала и отсутствие информации о том, как успешно внедрить ГИС в госструктурах. На официальном сайте электронного правительства Псковской области заявлен перечень функционирующих информационных систем, но все они предназначены для решения административных задач, среди них нет продуктов географической или гидрологической направленности [22]. Очевидно, в России все еще мало удачного опыта внедрения ГИС для целей управления водными ресурсами в государственных учреждениях.

Необходимо отметить, что по сравнению со многими регионами РФ Псковская область потенциально находится в более выгодных условиях с точки зрения внедрения современных методов исследования водных объектов. Объясняется это наличием на ее территории многочисленных трансграничных объектов. На ежегодно проводимых заседаниях, в которых участвуют как практики из выше указанных организаций, так и их эстонские коллеги и ученые из обеих стран, постоянно уделяется внимание внедрению современных методов и технологий, способных помочь получить новые данные о водных объектах и водотоках попадающих в область интересов водосборов. Так, 01 июля – 04 июля 2013 г. на заседании вышеуказанной рабочей группы специалистами ГГИ был представлен результат создания бассейновой ГИС при разработке СКИОВО – Аналитическая геоинформационная система «Гидрология-качество вод суши» (на примере бассейна р. Невы). На заседании в декабре 2012 г. в Таллинне специалистами Института Робототехники и Технической Кибернетики (Санкт-Петербург) были представлены результаты успешного восстановления температуры поверхности озера и содержания *Chlra*, выполненного по данным MODIS/Terra. Следовательно, существует и

интерес к современным технологиям, и потребность внедрения их в гидрологические приложения.

Очевидно, основными причинами, препятствующими широкому ускоренному внедрению ГИС и применению спутниковых данных в различных областях гидрологии, является отсутствие опытных специалистов и подробных методических указаний по применению встроенных модулей программ и по обработке данных дистанционного зондирования. В процессе работы над дипломным проектом приходилось тратить много времени на решение проблем, обусловленных вышеуказанными причинами. Тем не менее, использование ГИС (ArcGIS ArcMap 10.1) в сочетании с ЦМР (SRTM 4) цель проекта была достигнута. Подробное описание алгоритма оценки морфометрических характеристик водосбора р. Ловать и результаты его применения представлены в Главах 3 и 4.

3 ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЬЕФА (SRTM-4) И ArcGIS ArcMap 10.1 ДЛЯ ОЦЕНКИ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОСБОРА Р. ЛОВАТЬ

3.1 Цифровая модель рельефа SRTM

В последние годы данные цифрового рельефа становятся всё более открытыми. Их использование связано с современными компьютерными технологиями создания ГИС и предоставляет совершенно уникальный инструмент для анализа разнообразных природных явлений.

Современные естественнонаучные исследования предъявляют высокие требования к точности привязки данных и их размещения на разноцелевых картах. Основой всех построений является максимально детальные топографические карты, но они порой менее доступны, чем материалы спутниковой съёмки или данные цифрового рельефа [23].

На данный момент наиболее распространенными цифровыми данными формы поверхности Земли являются цифровые модели рельефа на основе ячейки (ЦМР). Эти данные используются в качестве входных данных для компьютерной количественной оценки характеристик земной поверхности.

ЦМР – это растровое представление непрерывной поверхности, обычно ссылающееся на поверхность Земли. Точность этих данных определяется, в первую очередь, разрешением (расстояние между точками образца). Другие влияющие на точность факторы – это тип данных (целочисленные или с плавающей точкой) и фактическая выборка поверхности при создании оригинальной [24].

Радарная топографическая съёмка (Shuttle radar topographic mission – общепринятое сокращение SRTM) большей части поверхности земного шара, за исключением океанов и самых северных ($>60^\circ$) и южных широт ($>54^\circ$), проведена NASA за 11 дней в феврале 2000 г. Объем собранной информации

составил более 12 терабайт данных, а их обработка заняла у специалистов NASA более двух лет. Результатом обработки данных съемки стала цифровая модель рельефа 85% поверхности Земли.

В настоящее время наиболее популярны данные SRTM-4: исходные сведения распространяются квадратами размером $5^{\circ} 5^{\circ}$, при максимальном доступном разрешении 3 арксекунды (90 м). Один дополнительный ряд (нижний) и одна колонка (правая) являются дублирующими и повторяются на соседней матрице, что позволяет при объединении квадратов избежать пикселей без сведений. Вертикальная погрешность ЦМР, как сообщается, менее 16м.

Данные являются простым 16-битным растром (без заголовка), значение пикселя соответствует высоте над уровнем моря в выбранной точке, а значение -32768 соответствует «no data» (нет сведений). Данные на территорию севернее 60° с.ш. были подготовлены в 2009 г. [22]. Название квадрата данных соответствует координатам его левого нижнего угла. Например, квадрат, в котором расположен г. Псков, выглядит так: N55E25 и соответствует 55° с.ш., 25° в.д.. Последние версии SRTM прошли дополнительную обработку: выделение береговых линий и водных объектов, фильтрацию ошибочных значений. Матрица данных может быть импортирована в различные программы построения карт и геоинформационные системы (например ArcGIS).

К основным направлениям использования цифрового рельефа в научных и практических целях относятся:

- визуализация рельефа и создание 3D моделей;
- создание цифровых моделей местности (ЦММ);
- построение гидросети;
- анализ затопляемых территорий в период паводка;
- Построение зон видимости для телекоммуникационных и сотовых компаний, архитектуры и городского планирования

- Расчет освещенности и ветрового режима для архитектуры и городского планирования, инженерных изысканий, экологического мониторинга
- Формирование атрибутивных и геометрических характеристик при создании и обновлении цифровых топографических карт

3.2 ArcGIS ArcMap 10.1: модули ArcGIS Гидрология и ArcGIS Spatial Analyst

ГИС – это мощный инструмент для управления водными ресурсами, позволяющий:

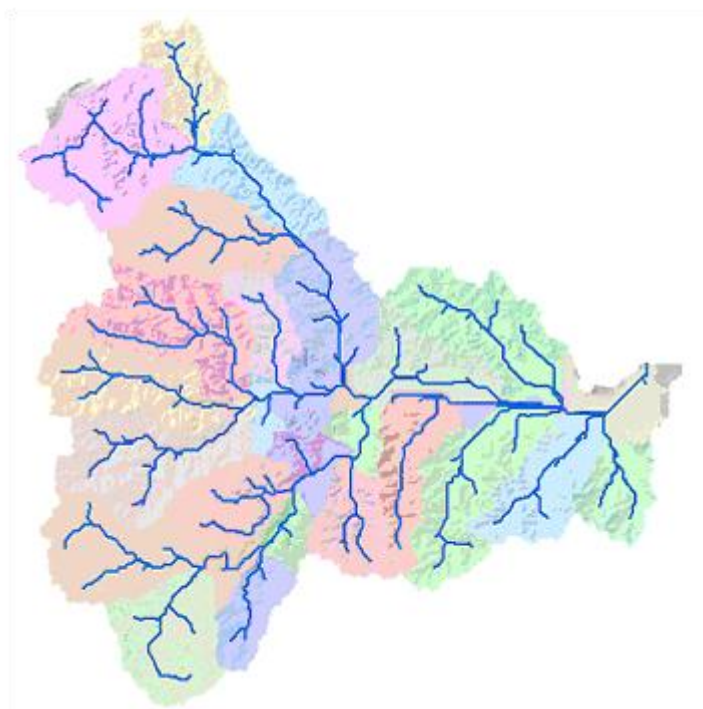
- Создавать и дополнять реестр водных объектов;
- Оценивать состояние, качество, уровень загрязнения, объемы водных ресурсов;
- Осуществлять гидрологические исследования;
- Обеспечивать управление в чрезвычайных ситуациях (паводки, наводнения);
- Рассчитывать и моделировать гидротехнические сооружения, зоны затопления и пр.;
- Обеспечивать охрану водных ресурсов [25].

ArcGIS позволяет построить единую систему управления ресурсами, объединяющую в себе пространственные и другие данные из различных источников, в том числе данные мониторинга, полевых измерений, спутниковую информацию и др.

Для выполнения задач дипломного проекта было необходимо освоить модуль ArcGIS Гидрология и инструмент ArcGIS Spatial Analyst. Инструменты модуля Гидрология разработаны для моделирования конвергенции потока по естественной поверхности. Существует предположение, что поверхность содержит достаточно вертикальный рельеф для определения пути потока. Инструменты работают на предположении, что вода может втекать в любую одну ячейку из нескольких смежных, но вытекать только через одну ячейку. Дополнительный модуль ArcGIS Spatial Analyst предоставляет возможность описания физических компонентов поверхности.

Модуль ArcGIS Гидрология

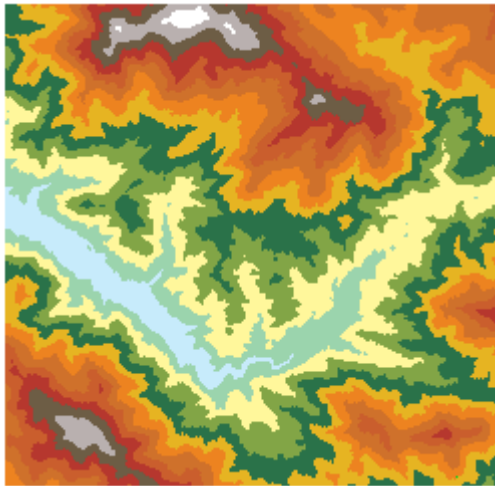
Инструменты гидрологического моделирования в наборе инструментов дополнительного модуля Гидрология позволяют идентифицировать приемники, определять направление потока, вычислять суммарный сток, разграничивать водоразделы и создавать сети водотоков. На рисунке ниже показана водная сеть, полученная на основе модели рельефа:



Пример сети водотоков, полученных на основе модели рельефа

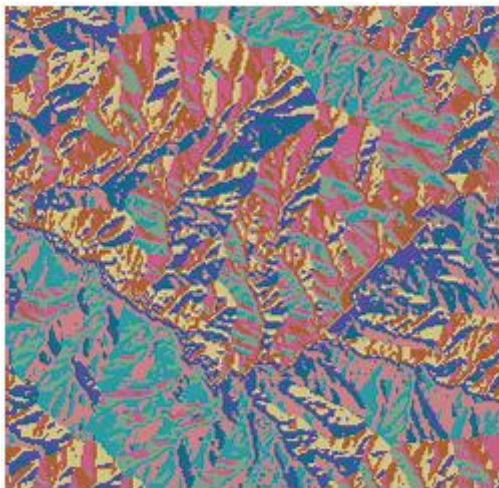
Используя растр высоты или ЦМР в качестве входных данных, возможно автоматически определить дренажную систему и выявить количество характеристик системы. Следующие диаграммы иллюстрируют шаги для вычисления водораздела и сети водотоков из ЦМР.

1. ЦМР участка, на котором будет выполняться гидрологический анализ.



Входная поверхность ЦМР

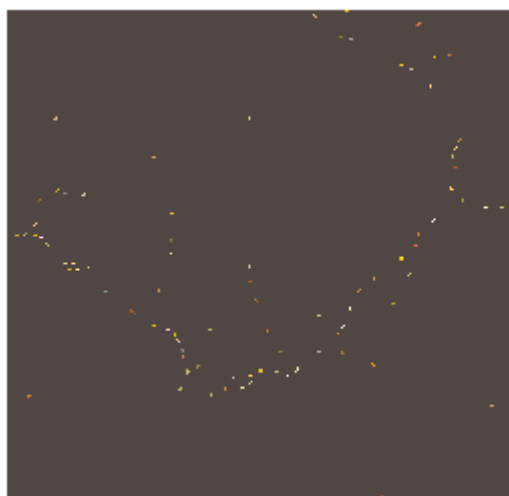
2. При использовании ЦМР (DEM) в качестве входных данных инструмента Направление стока (Flow Direction) определяется направление, в котором вода вытекает из каждой ячейки.



*Определяется направление
потока.*

3. С помощью инструмента Локальное понижение (Sink) определяются локальные понижения в исходной ЦМР (DEM). Локальное понижение – это обычно некорректное значение, меньше значений окружающих местоположений. Локальные понижения, показанные на диаграмме выше (рассеянные цветные точки), являются проблематичными, т.к. вода, попадающая в них, не может выходить наружу. Чтобы обеспечить надлежащее

дренажное картирование, эти локальные понижения можно заполнить с помощью инструмента Заполнение локальных понижений (Fill).



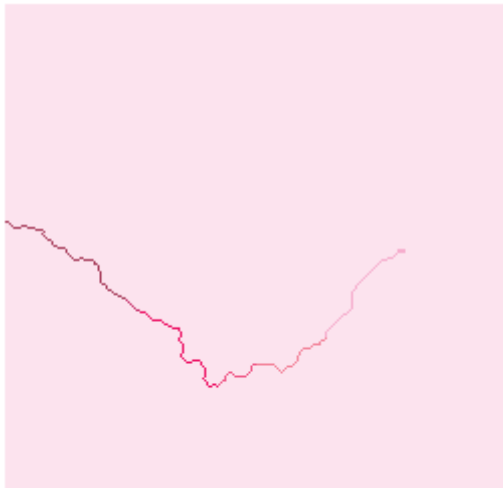
Определяются приемники.

4. С помощью инструмента Водораздел (Watershed) очерчиваются водоразделы для заданных местоположений.



Определение водотоков.

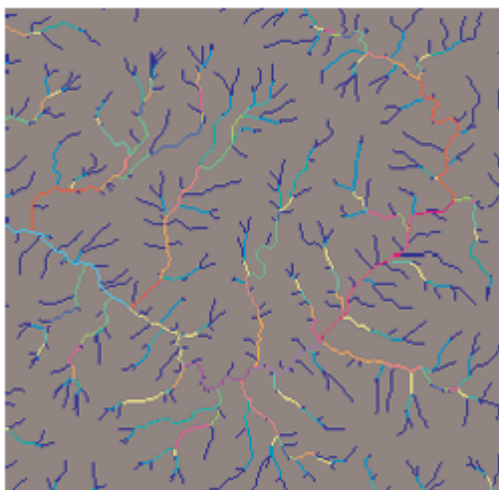
5. Чтобы создать сеть водотоков, используют инструмент Суммарный сток (Flow Accumulation) для вычисления количества ячеек вверх по склону, впадающих в местоположение. Выходной растр направления потока, созданный в предыдущем шаге, используется в качестве входных данных.



Выходные данные суммарного стока

6. Порог может быть задан на растре, полученном из инструмента Суммарный сток (Flow Accumulation); начальным этапом является определение системы сети водотоков. Эту задачу можно выполнить с помощью инструмента Условие (Con) или Алгебра карт (Map Algebra). Пример общего синтаксиса в инструменте Условие (Con): `newraster = con(accum > 100, 1)`. Все ячейки, в которые выполняется сток из более чем 100 ячеек, будут частью сети водотоков.

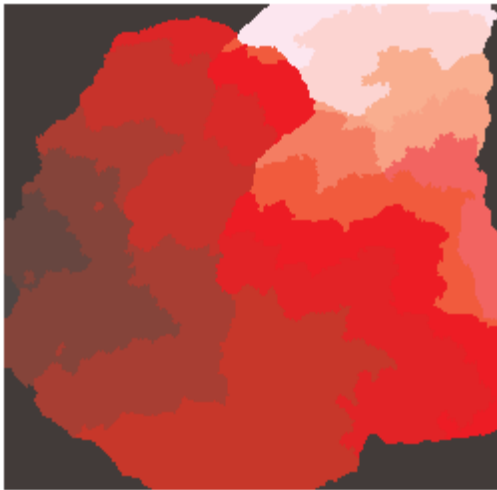
7. Чтобы представить порядок каждого сегмента в сети, применяют инструмент Порядок водотоков (Stream Order). Для упорядочения водотоков применяются две технологии, Шреве и Страхлера.



Выходные данные

упорядочения водотоков

8. При использовании инструмента Длина линии стока (Flow Length) можно определить длину пути потока вниз или вверх по течению из каждой ячейки в пределах данного водораздела. Это полезно для вычисления времени перемещения воды через водораздел [3].



*Выходные данные длины
линии стока*

Модуль ArcGIS Spatial Analyst

Модуль ArcGIS Spatial Analyst представляет собой мощное средство для пространственного анализа, добавляющее специфическую функциональность к ArcGIS. ArcGIS Spatial Analyst объединяет возможности ArcView Spatial Analyst и ARC GRID.

Интерфейс модуля ArcGIS Spatial Analyst добавляется в виде самостоятельной панели инструментов к интерфейсу ArcMap. Его функции могут применяться к слоям, добавляемым к ArcMap, а также к растровым и векторным наборам данных, которые выбираются при помощи браузера файлов, доступного в каждом из диалоговых окон модуля. Функции Spatial Analyst работают также по выборке, сделанной в слоях по атрибутивным или пространственным критериям.

Функциональность ArcGIS Spatial Analyst

Картирование расстояний;

Картирование плотности;

Интерполяция растра. Интерполяция позволяет вычислить значения для всех ячеек растра по значениям ограниченного числа точек опробования. Может использоваться для предсказания значений для любых географических данных, измеряемых в определенных точках: рельефа, уровня осадков, концентраций химических веществ, уровней шума и т.д. Предлагаемыми в модуле Spatial Analyst методами интерполяции являются методы Обратно взвешенных расстояний, Кригинг и Сплайн, которые основаны на разных предположениях о наилучшей оценке. Метод выбирают исходя из того, какое явление оценивается, и как распределены точки опробования.

Анализ поверхности. Рассчитав растровую поверхность, можно столкнуться с тем, что некоторые закономерности распределения на ней не выявляются, поэтому необходимо применить функции анализа. В Spatial Analyst включены функция построения изолиний; функция вычисления уклона; функция вычисления экспозиции склонов; функция отмывки рельефа и функция расчета видимости.

Функции статистики вычисляют такие характеристики как большинство, меньшинство, максимум, минимум, среднее, медиана, диапазон, среднеквадратичное отклонение, сумма и многообразие.

Статистика по ячейкам предназначена для вычисления статистических характеристик между многими растровыми слоями, например, для анализа изменения параметра за многолетний период. С помощью функции Зональной статистики статистические характеристики вычисляются по значениям одного набора данных для зон, определяемых другим набором (например, среднее количество осадков для каждой лесной зоны).

Переклассификация. Эта функция выполняет замену значений ячеек другими значениями, что может быть использовано для группировки значений ячеек, например, для объединения всех видов характеристик в один класс.

Калькулятор растров. Это мощный инструмент для вычислений, поддерживающий многочисленные операторы и функции, запросы выборки, а также синтаксис алгебры карт. Входными данными для калькулятора могут быть наборы грид данных или растровые слои, шейп-файлы, таблицы, константы и числа. Его действие основано на выполнении математических операторов и вычислении математических функций, а алгебра карт позволяет производить, например, вычисления уклона или статистических характеристик ячеек для нескольких растровых слоев.

Конвертация. Если для анализа требуется растровый тип данных, при помощи Spatial Analyst можно конвертировать векторные данные в растр, причем это может быть покрытие, шейп-файл или данные САПР. Также возможно обратное преобразование.

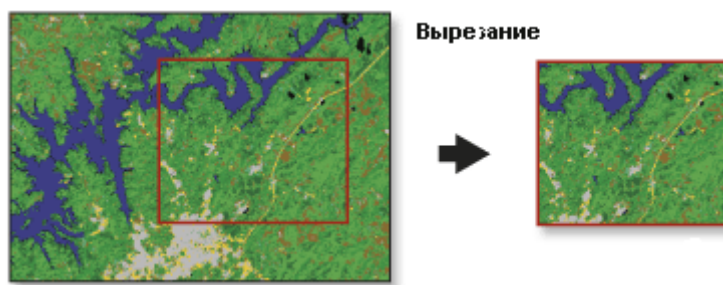
3.3 Вспомогательные инструменты

Помимо описанных инструментов гидрологического моделирования для достижения цели необходимо применить следующие инструменты:

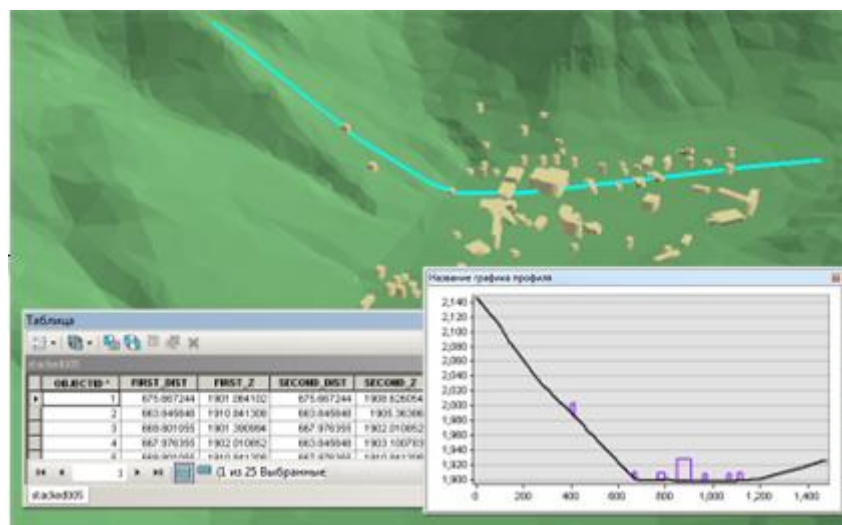
1. При создании сети водотоков рабочая область заполняется излишним количеством водотоков с малыми аккумуляционными значениями, что приводит к визуальной перегрузке рабочего пространства. Для устранения этого недостатка необходимо применить инструмент *Условие* (Con), позволяющий контролировать выходное значение для каждой ячейки на основе того, оценивается ли значение ячейки как Истина или как Ложь в заданном высказывании условия.

Концептуально, в процессе применения инструмент *Условие* (Con) анализирует каждую ячейку и, основываясь на значении ячейки и высказывании условия, определяет, оценивается ли ячейка как Истина или как Ложь. Если ячейка оценивается как Истина, выходное значение для этого местоположения определяется в истинных входных данных. Если ячейка оценивается как Ложь, выходное значение для этого местоположения определяется в ложных входных данных.

2. Инструмент *Вырезать* (Clip) позволяет извлекать фрагменты набора растровых данных на основании экстенда шаблона. Вырезанные выходные данные включают пиксели, которые пересекают экстенд шаблона. Данный инструмент хранится в наборе инструментов *Управление данными* (Data Management).



3. Для конвертации набора растровых данных в полигональные пространственные объекты применяется инструмент *Растр в полигоны* (Raster to Polygon), хранящийся в наборе инструментов *Конвертация* (Conversion)
4. Для определения уклонов необходимо воспользоваться инструментом *Профиль стека* (StackProfile), который входит в набор инструментов *3D Анализ* (3D Analyst)



Реализация этого алгоритма для 21 водосбора исследуемой территории представлена в следующей Главе 4.

4 ОБРАБОТКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1 Исходные данные

Таблица 4.1 Сводная таблица информации по гидрологическим постам

№№ п/п	Название водного объекта и пункта наблюдений	Код водного объекта	Расстояние (км.) от		Площадь водо- сбора, кв.км.	Координаты	
			истока	устья		широта гр. мин.	долгота гр. мин.
1	р. Ловать - д. Узкое	102002259	41,0	489	398	55,46	30,33
2	р. Ловать - г. Вел. Луки	102002259	175	355	3270	56,21	30,31
3	р. Ловать - д. Сельцо	102002259	269	261	8230	56,56	30,41
4	р. Ловать - г. Холм	102002259	337	193	14700	57,09	31,11
5	р. Ловать - пгт Парфино	102002259	496	34,0	17500	58,0	31,39
6	р. Ловать - с. Взвод	102002259	522	7,50	21800	58,1	31,29

Описание гидрологических постов:

1. *р. Ловать – д. Узкое.*

Пост расположен в деревне 1 км выше моста шоссейной дороги. Долина реки пойменная, склоны долины пологие, незаметно сливающиеся с равниной.. Русло реки слабоизвилистое, устойчивое, густо зарастет водной растительностью шириной в межень до 30 – 40 м. Водопост находится на правом берегу, в 80 м ниже моста на грунтовой дороге и состоит из свай и двух реперов.

Отметка нуля графика 45, 14 м усл.

2. *р. Ловать – г. Великие Луки.* Пост находится в 1.57 м ниже моста.

Прилегающая местность – равнина, долина реки ясно выражена, русло реки извилистое, с крутыми, относительно высокими берегами.

Пост расположен на правом берегу и состоит из свай, реперов и установки берегового типа для самописца уровня воды.

Отметка нуля поста 81.00 м БС.

3. *р. Ловать – д. Сельцо.* Пост находится в 2.7 км выше впадении р. Сороти.

Прилегающая местность – слабовсхолмленная равнина, пересеченная долинами рек, оврагами и ручьями, долина реки ясно выражена, со сравнительно высокими склонами, русло реки прямолинейное, с крутыми высокими берегами.

Пост расположен на левом берегу, в 70 м ниже моста и состоит из свай и реперов.

Отметка нуля поста 861.64 м БС.

4. *р. Ловать – г. Холм.* Пост находится у деревни, в 1.5 км от г. Острова, в 3.0 км от железобетонного моста.

Прилегающая местность предоставляет собой распаханную равнину, долина реки ясно выражена, русло реки прямолинейное, с крутыми высокими берегами.

Пост расположен на правом берегу, в 0.8 км впадения р. Щепец и состоит из свай и реперов.

Отметка нуля поста 43.43 м БС.

5. *р. Ловать – пгт Парфино.* Пост находится у деревни, в 5.4 км ниже впадения р. Щепец.

Прилегающая местность – распаханная равнина, долина реки ясно выражена, с высокими крутыми склонами, русло реки прямолинейное.

Пост расположен на правом берегу и состоит из свай и реперов.

Отметка нуля поста 39.64 м БС.

6. *р. Ловать – с. Взвяд.* Пост находится в городе,

Долина реки ясно выражена, с высокими крутыми склонами, русло прямолинейное, с высокими берегами.

Пост расположен на левом берегу и состоит из свай, рейки, репера, установки берегового типа для самописца уровня воды.

Отметка нуля поста 29.26 м Б

Для корректного нанесения постов на ЦМР необходимо преобразовать координаты постов из град. мин. в десятичные градусы. Пересчет осуществляется по формуле (4.1)

$$DDD = DD + \frac{MM}{60}, \quad (4.1)$$

где DDD – координаты в формате десятичные градусы; DD – градусы; MM – минуты.

Таблица 4.2 – Преобразованные координаты гидрологических постов

№№ п/п	Название водного объекта и пункта наблюдений	Координаты	
		широта дес. град	долгота дес. град
1	р. Ловать - д. Узкое	55,7677	30,0128
2	р. Ловать - г. Великие Луки	56,3500	30,0058
3	р. Ловать - д. Сельцо	56,9333	30,0156
4	р. Ловать - г. Холм	57,1500	31,0025
5	р. Ловать - пгт Парфино	58,0000	31,0000
6	р. Ловать - с. Взвзд	58,1667	31,0028

Для топологической основы выбраны 2 участка ЦМР: srtm_42_01 и srtm_43_01, которые в дальнейшем объединяются в единый участок ЦМР (рисунок 4.1).

Для уменьшения времени обработки информации, содержащейся в ЦМР, и дальнейшего удобства работы пользователя необходимо удалить область ЦМР, не задействованную в обработке. В результате этого действия был получен участок ЦМР соответствующий водосбору р. Ловать (рисунок 4.2).

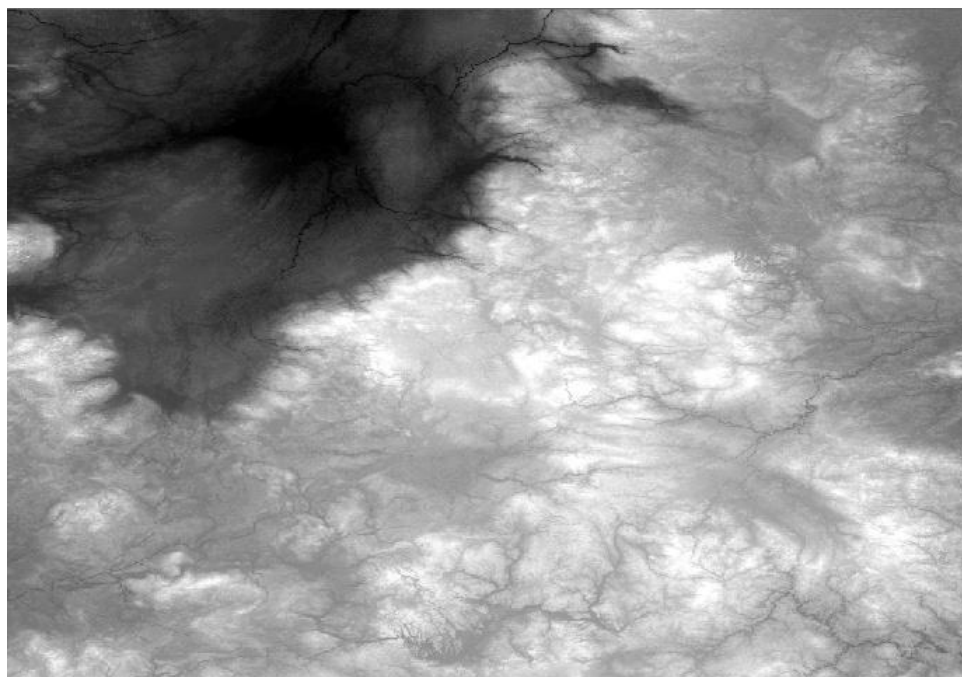


Рисунок 4.1 Объединенные участки ЦФР

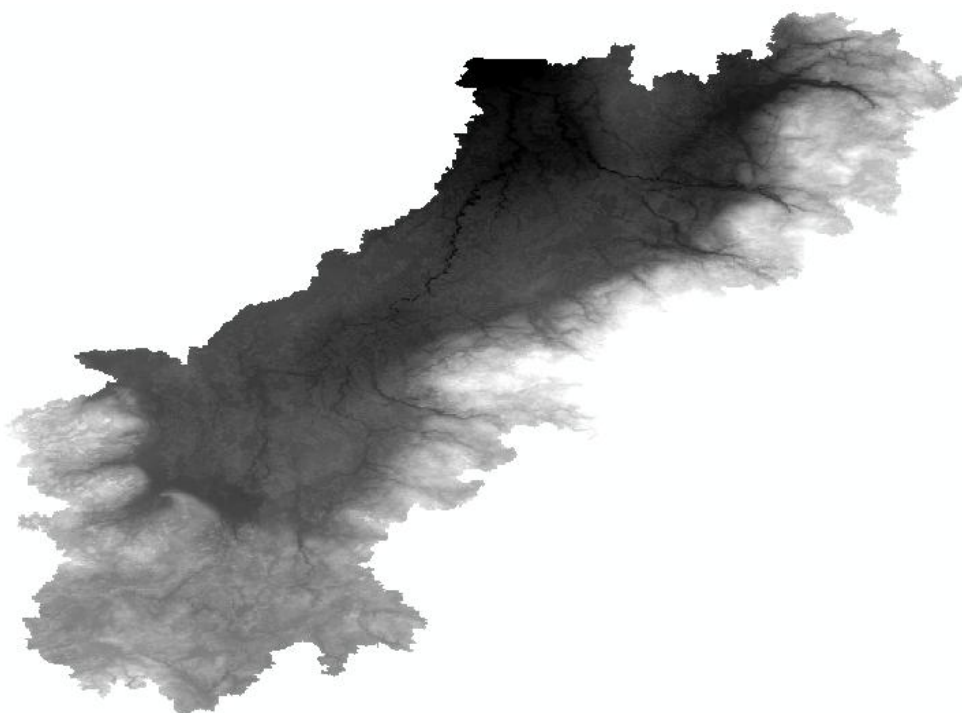


Рисунок 4.2 Водосбор р.Ловать

4.2 Вычисление морфометрических характеристик

Первым делом необходимо нанести посты гидрологического наблюдения на ЦМР, однако координаты гидрологических постов относятся к системе географических координат ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 года), которая является государственная геоцентрическая система координат, используемой в России.

Сама ЦМР выполнена в WGS84 (World Geodetic System 1984). Это трёхмерная система координат для позиционирования на Земле, которая в отличие от локальных систем, является единой системой для всей планеты.

ArcGIS обладает инструментом, способным выполнить преобразование географических координат из ПЗ-90 в WGS84.

Далее посты наносятся на ЦМР (рисунок 4.3).

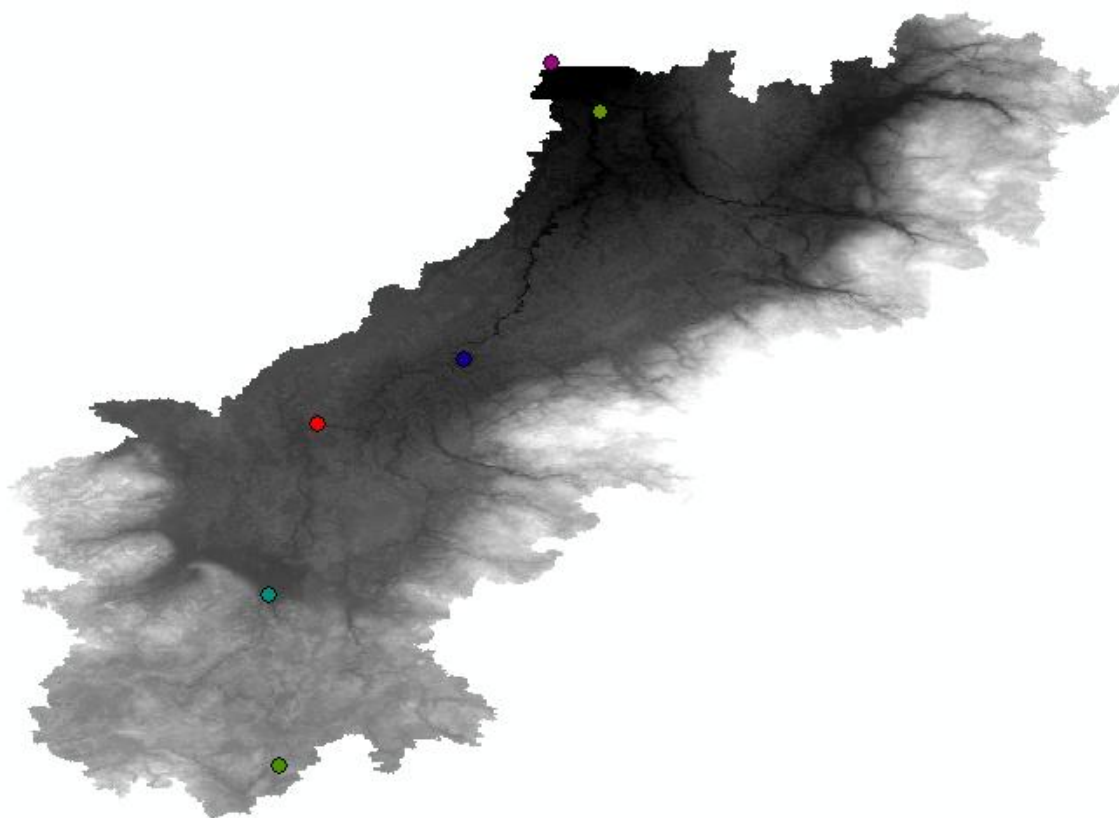


Рисунок 4.3 Посты гидрологических наблюдений

Теперь, когда посты нанесены на ЦМР можно приступить к выполнению алгоритма вычисления морфометрических характеристик водотоков и их водосборов.

Для наглядного примера взят пост р. Лиерна – д. Дядно (рисунок 4.4).

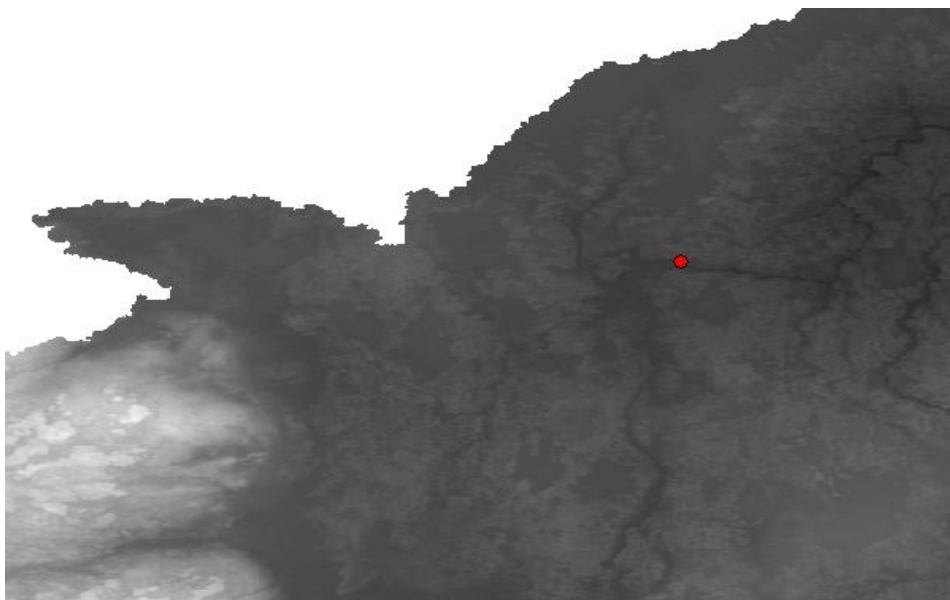


Рисунок 4.4 Гидрологический пост р. Ловать – д. Сельцо

Для удаления всех ошибок и неточностей на ЦМР необходимо применить инструмент *Заливка(Fill)* (рисунок 4.5), который заполнит все локальные понижения.

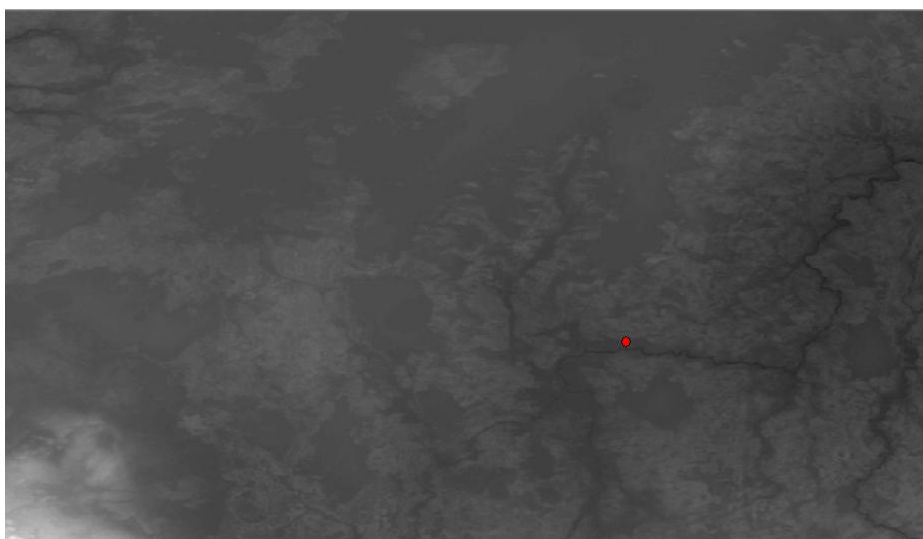


Рисунок 4.5 Заполнение локальных понижений

Для определения направления, в котором вода вытекает из каждой ячейки, применяется инструмент *Направление стока (Flow Direction)* (рисунок 4.6).

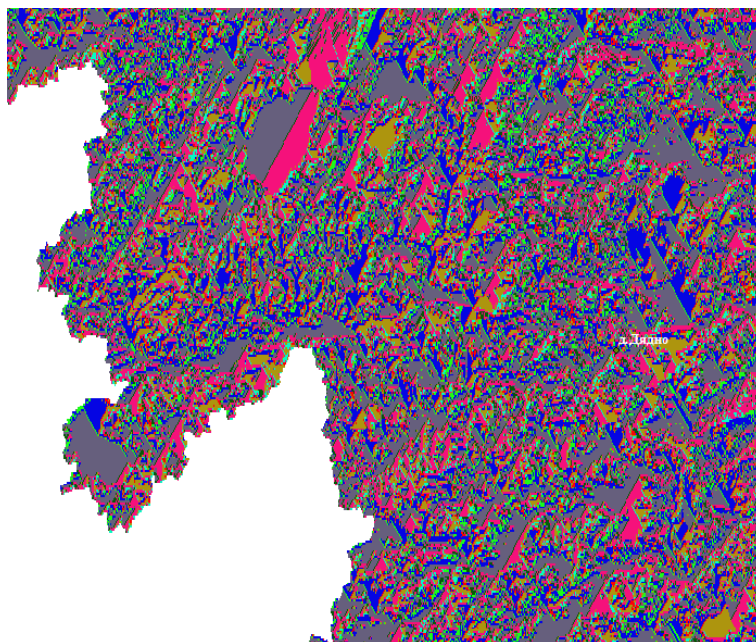


Рисунок 4.6 Направление стока

На следующем этапе используется инструмент *Суммарный сток (Flow Accumulation)*.

В результате чего создается модель русловой сети (рисунок 4.7).

В отличие от примененных ранее инструментов, данный инструмент требует внимания пользователя программы. Модель не способна воспроизводить площадные водные объекты, что приводит к построению водотоков прямо по территории, занятой озером, морем или водохранилищем

В дополнение, визуализация густоты речной сети, которая регулируется минимальным значением аккумуляционного стока, также зависит от пользователя.

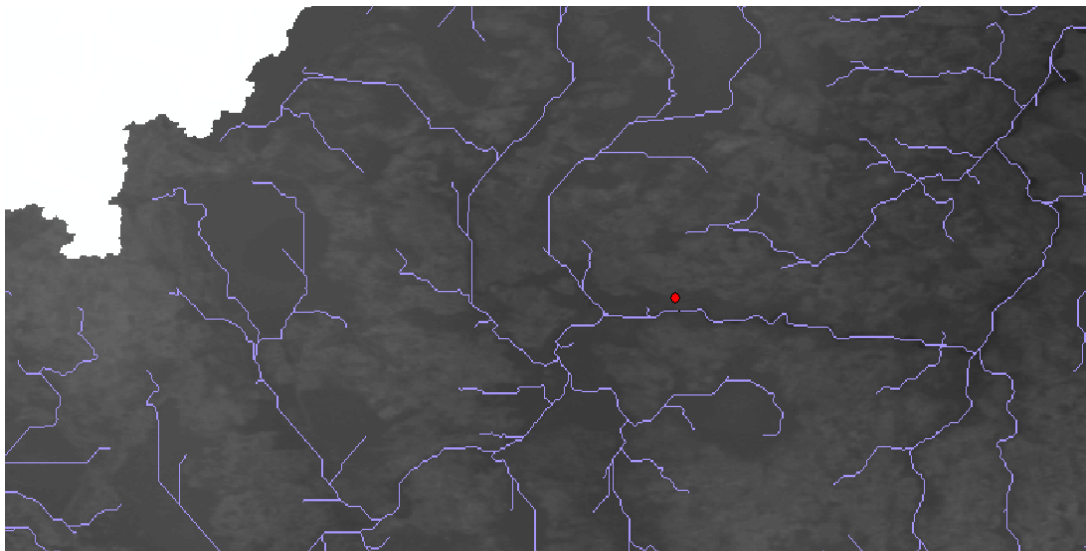


Рисунок 4.7 Модель русловой сети

Для предотвращения затрат времени и сил необходимо освободить полученную модель от аккумуляционного стока, который имеют значения меньше того, что выбран пользователем.

В качестве такого значения было выбрано значение минимального аккумуляционного стока равное 5000.

Для удаления значений меньших 5000 применяется инструмент Условие (Con) (рисунок 4.8).

В результате получена новая русловая сеть.

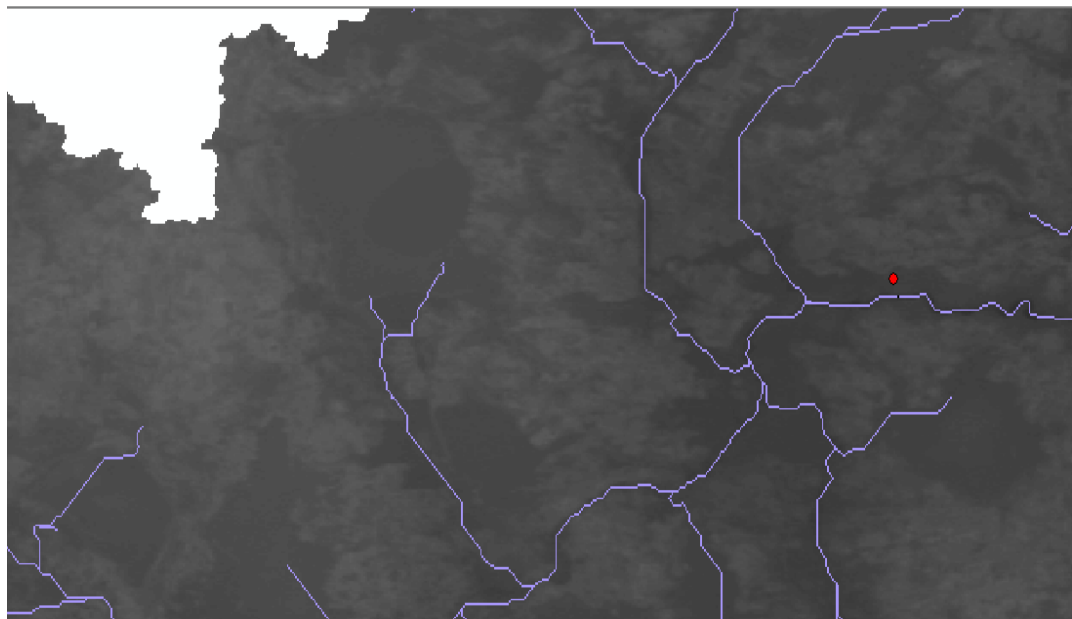


Рисунок 4.8 новая модель русловой сети

Для построения водораздела необходимо привязать гидрологический пост к модели русловой сети.

Чтобы этого достичь применяется инструмент *Привязка точки устья* (*Snap Pour Point*) (рисунок 4.9).

При активации инструмента необходимо узнать расстояние от поста до модели русловой сети.

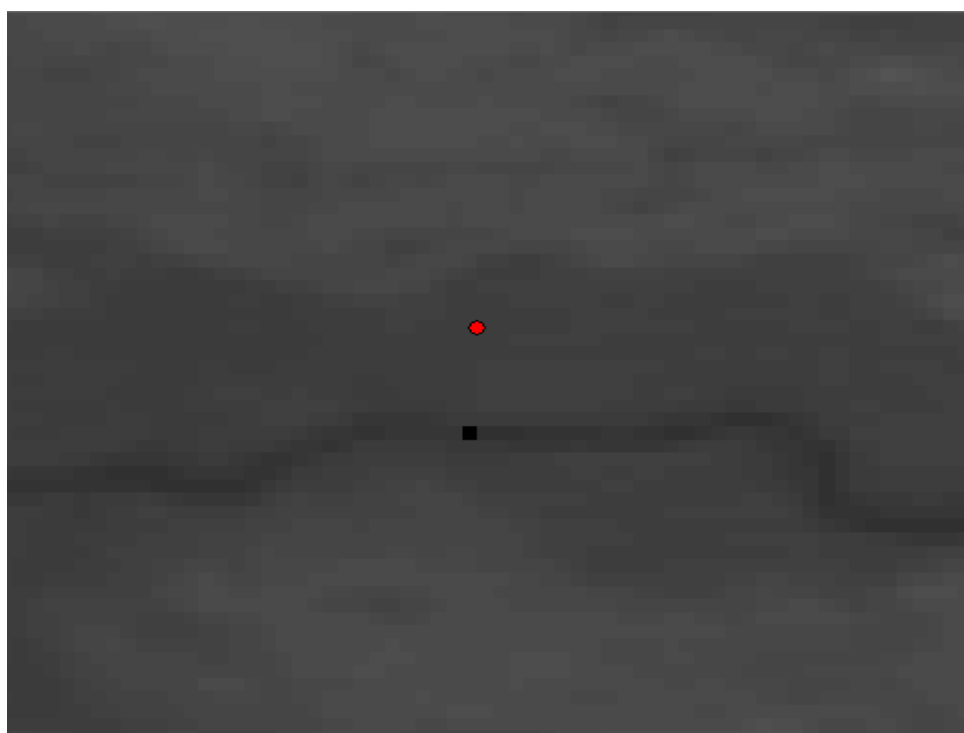


Рисунок 4.9 Привязка гидрологического поста

На основе данных, полученных в ходе обработки ЦМР инструментами *Направление стока* и *Привязка точки устья*, строится водосбор.

Для этого активируется инструмент *Водораздел* (*Watershed*) (рисунок 4.10).

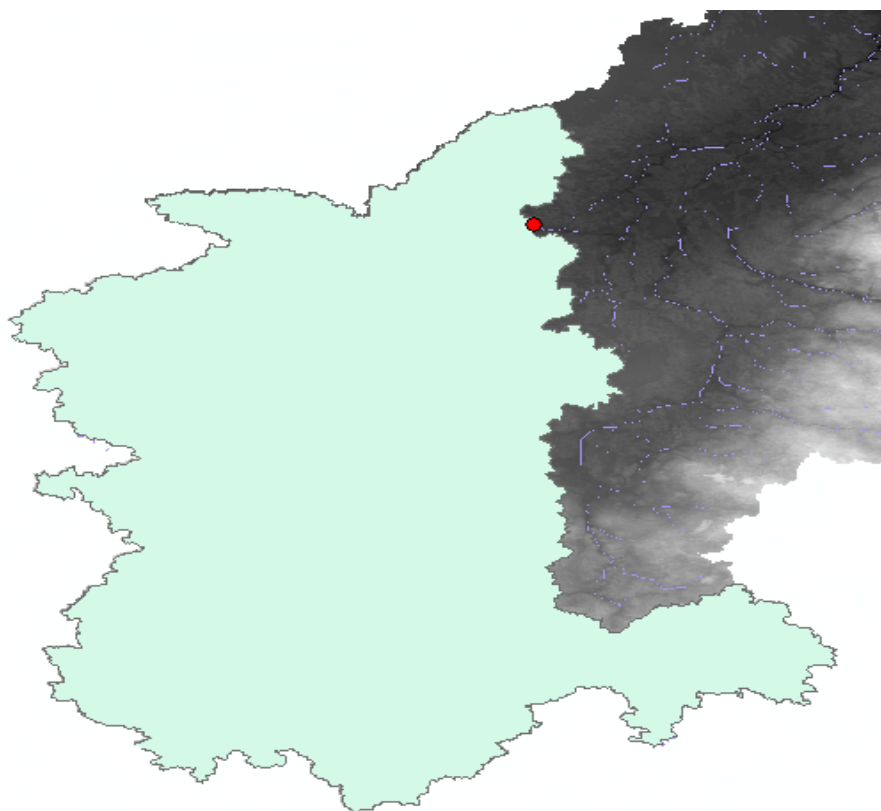


Рисунок 4.10 Водосбор р. Ловать – д. Сельцо

Для дальнейшей работы с водосбором его необходимо преобразовать из растра в полигон. Результатом чего является схема водосбора (рисунок 4.11).

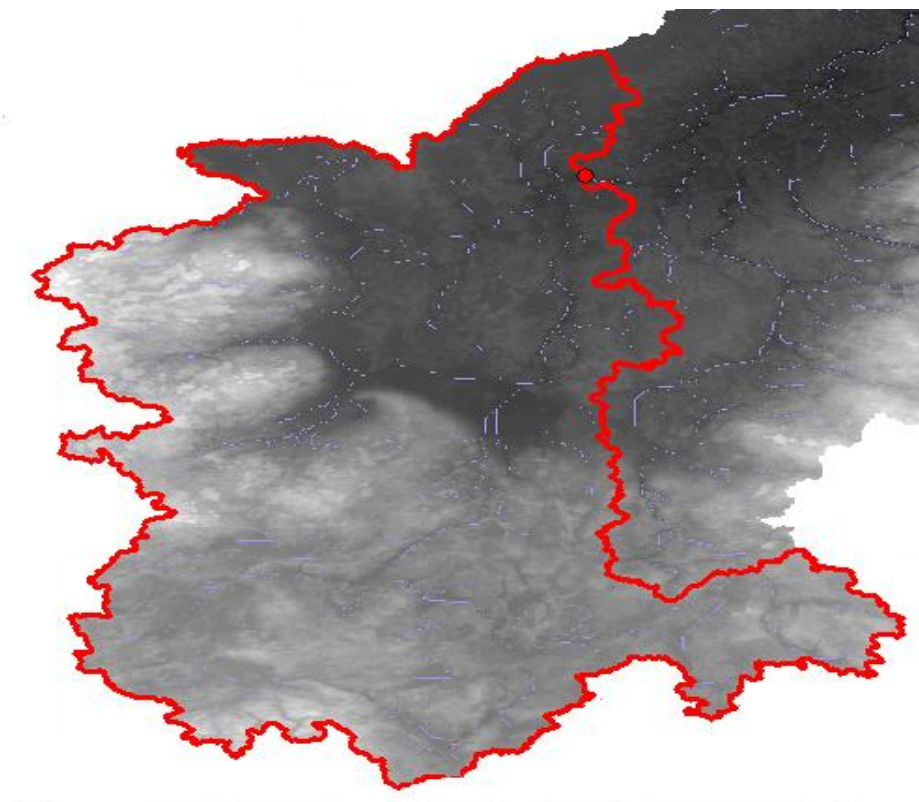


Рисунок 4.11 Схема водосбора р. Ловать – д. Сельцо

Операция перевода раstra в полигон позволяет получить атрибутивную таблицу с данными для дальнейшего расчета площади водосбора.

Для расчета площади водосбора в ArcGIS был использован инструмент *Вычислить Геометрию (Calculate Geometry)*.

Данный инструмент хранится в атрибутивной таблице, для его работы пользователю необходимо создать новый столбец с названием «Area». Это условие обязательно, чтобы можно было посчитать площадь.

На дальнейшем этапе сеть водотоков разбивается на участки, ограниченные местами слияния водотоков. Это осуществляется инструментом *Идентификация водотоков (StreamLink)*. При этом водотоки разбиваются на сегменты.

Однако, эти данные представлены в растровом формате. Чтобы продолжить работу с ними они проходят обработку инструментом *Водоток в пространственный объект (Stream to Feature)*, который преобразует растр в линии.

Чтобы ограничить только область покрытия водосбора с помощью инструмента *Вырезание (Clip)* отделяем только те участки, которые находятся в водосборной области.

Далее выделяются участки, формирующие наибольший по длине водоток (рисунок 4.12).

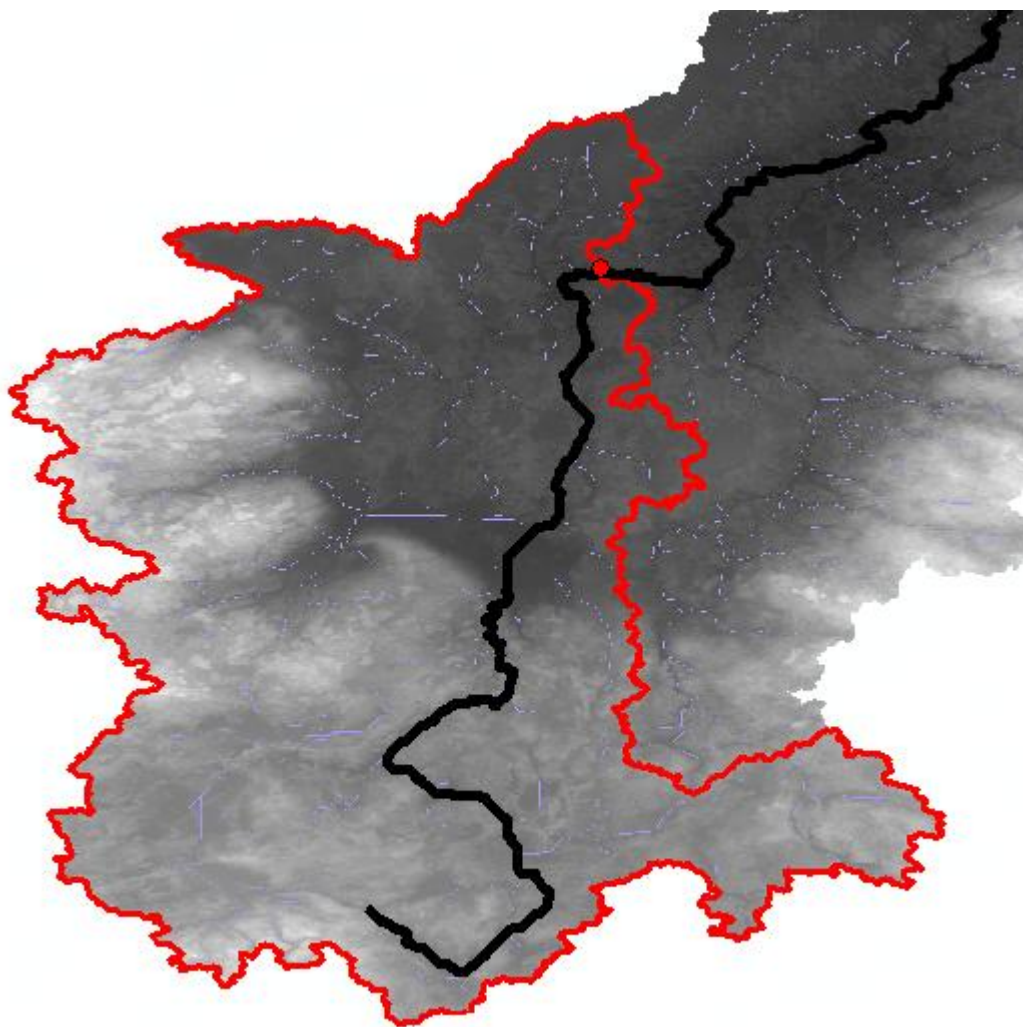


Рисунок 4.12 Идентификация водотоков в водосборе

В атрибутивной таблице удаляются все участки, которые не попали в выделенную на (рисунке 4.12) линию. Результат представлен (на рисунке 4.13). Тут же рассчитывается суммарная длина полученного водотока.

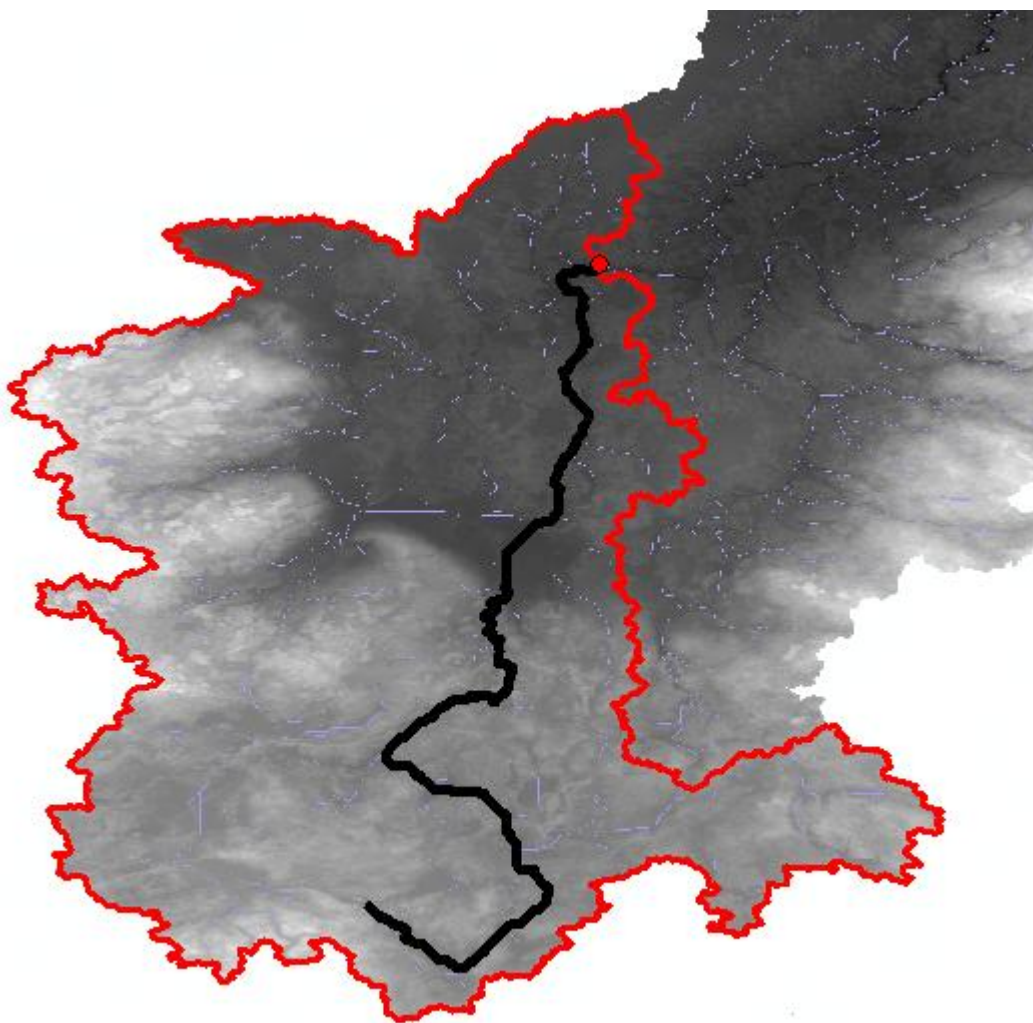


Рисунок 4.13 Конечный водоток

Далее следует построение уклона реки инструментом *Профиль стека* (*StackProfile*).

В качестве входных данных выступает ЦМР и ранее созданный водоток.

В результате создается атрибутивная таблица, которая содержит отметки высот и расстояние, выраженное в километрах, между этими отметками. По этим данным строится продольный профиль реки.

Таблица 4.3 – Оценка точности определения площади водосбора

№ п\п	Пост	F, км ²			Погрешность, %	
		ОГХ	ArcGis	MapInfo	ArcGis	MapInfo
1	д. Узкое	398	354	398	11	0,05
2	г. Великие Луки	3270	4386	3203	34,1	2,05
3	д. Сельцо	8230	9690	8264	17,7	0,41
4	г. Холм	14700	15908	14639	8,2	0,41
5	пгт. Парфино	17500	19553	17429	11,7	0,41
6	д. Взвяд	21800	27973	21835	28,3	0,16
	Среднее значение	10983	12977	10961,3	18,5	0,6

Таблица 4.4 – Оценка расчета длины

№ п\п	Пост	L, км (от истока)			Погрешность, %	
		ОГХ	ArcGis	MapInfo	ArcGis	MapInfo
1	д. Узкое	41	31	41	24,4	0,00
2	г. Великие Луки	175	124	144	29,1	17,7
3	д. Сельцо	269	200	225	25,7	16,4
4	г. Холм	337	258	283	23,4	16,0

4.3 Анализ рассчитанных величин и их погрешностей

При определении площади водосбора в программе ArcGis максимальная относительная погрешность составила 34 % , а средняя 18.5%.

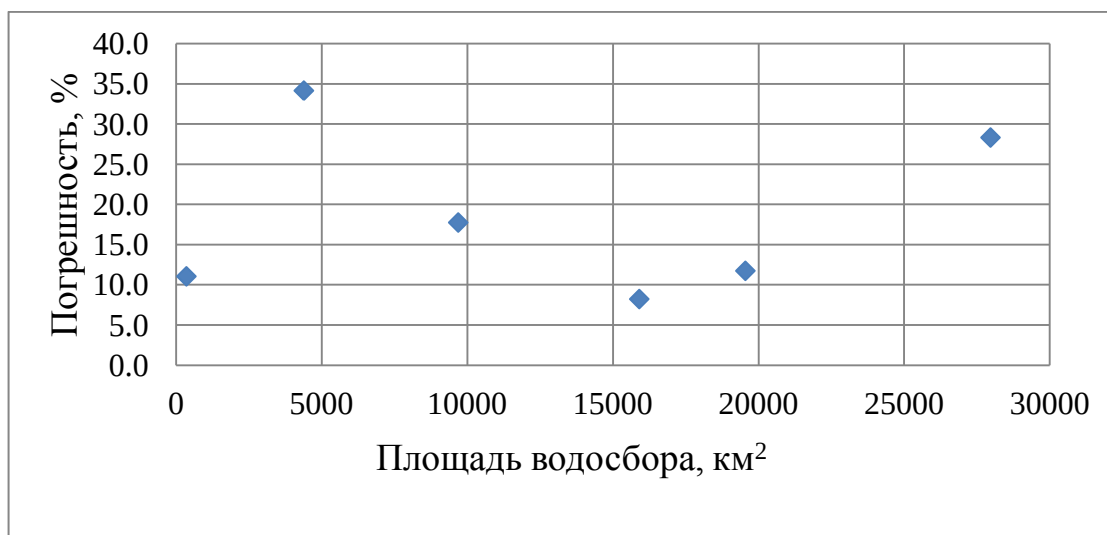


Рисунок 4.14 - Зависимость погрешности расчета площади водосбора от размера водосбора (ArcGis)

При определении длин для четырех участков реки Ловать максимальное значение погрешности составило 29.1%, а среднее 25%.

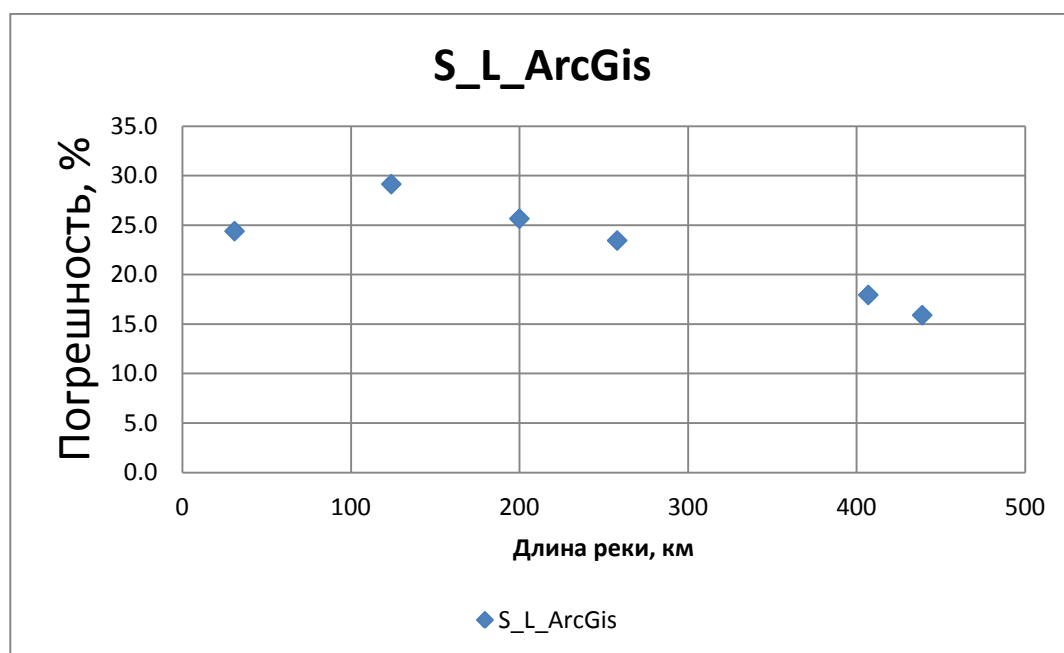


Рисунок 4.15 - Зависимость погрешности расчета длины участка реки от его размера (ArcGis)

Анализ топографической карты показал, что местоположение истока реки было определено неправильно, причиной этого является многосложность водораздельного участка: характерный плоский рельеф Приильменской низменности, наличие в районе истока реки двух озёр Ловатец и Завесно, а также болота Чистик. Соответственно расчет уклона не производился, так как его значение напрямую зависит от вычисленной длины.

При определении длин в программе MapInfo погрешность измерений не превышает 18%.

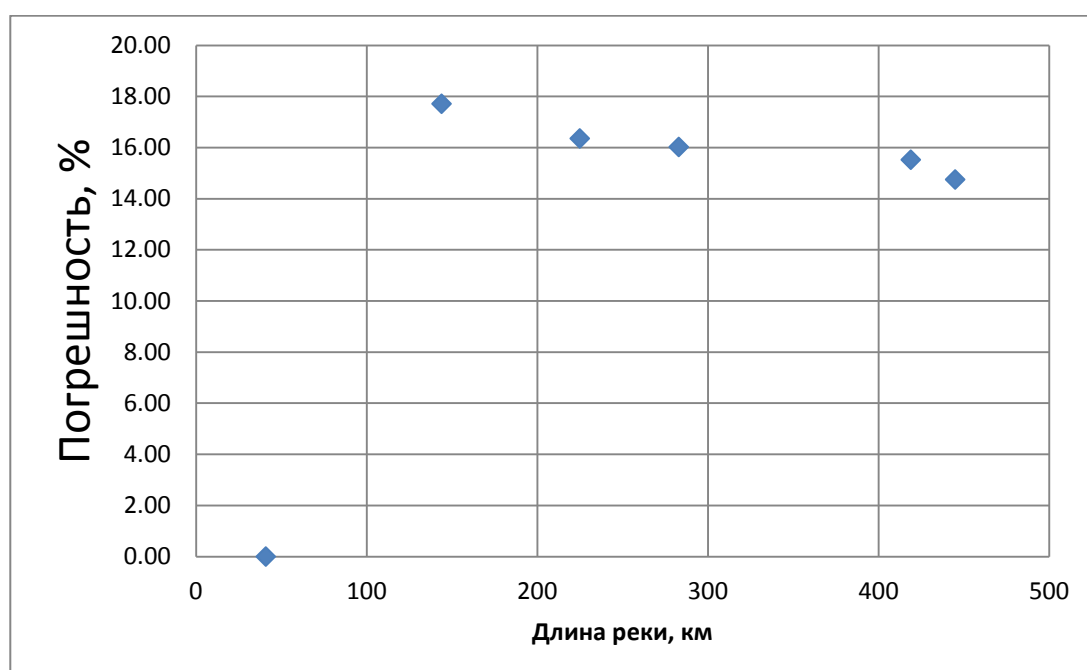


Рисунок 4.16 - Зависимость погрешности расчета длины участка реки от его размера (MapInfo)

Погрешность, полученная при определении длины реки, вызвана: масштабом топографической карты (1:1000000), низкой степенью освоения инструментов программы и недостаточным опытом работы с ними, субъективизмом, который сопровождает процедуру определения длины водотока.

Максимальное значение погрешности определения площади водосбора составило 2.05%, в остальных случаях не более 0.41%.

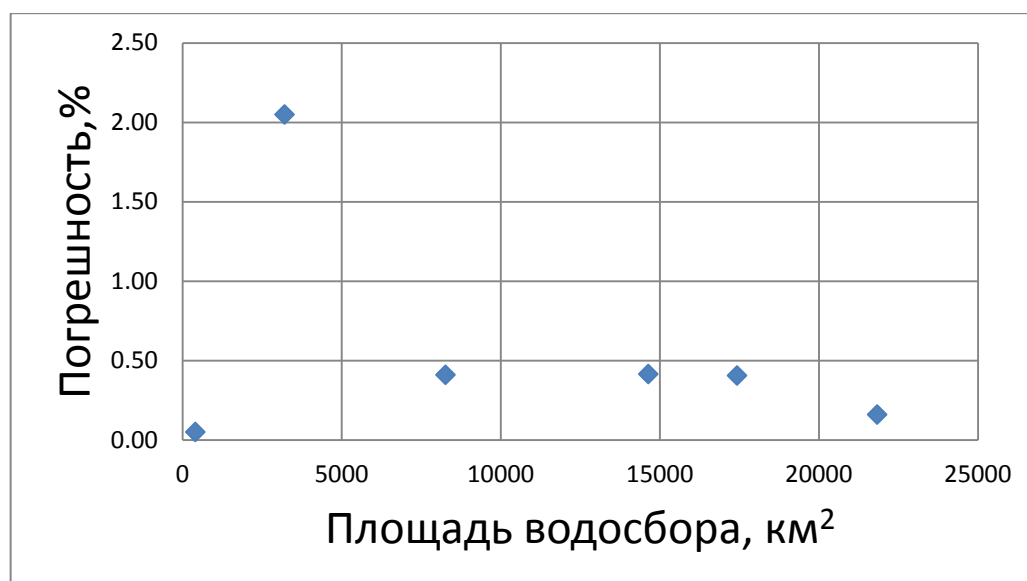


Рисунок 4.17 - Зависимость погрешности расчета площади водосбора от размера водосбора (MapInfo)

Следует отметить, что максимальная величина погрешности при определении площади водосбора в обеих ГИС получена для поста в г. Великие Луки. В случае с ArcGis причиной могло стать некорректное определение программой линии водораздела из-за наличия на данной территории болот. Однако можно предположить, что со времени определения и занесения площади водосбора в ОГХ на территории водосбора произошли изменения рельефа или при определении площади водосбора была допущена ошибка.

Осуществлена проверка значимости тренда. Результат проверки показал, что тренд значим.

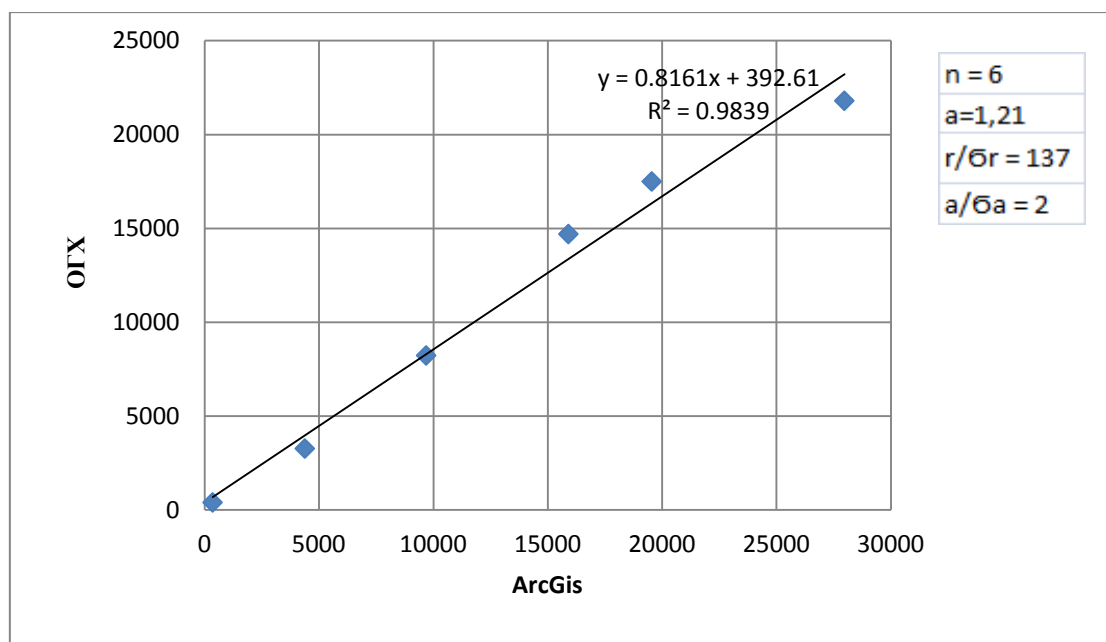


Рисунок 4.18 - Зависимость площади водосбора по данным ОГХ от вычисленных значений в ArcGis

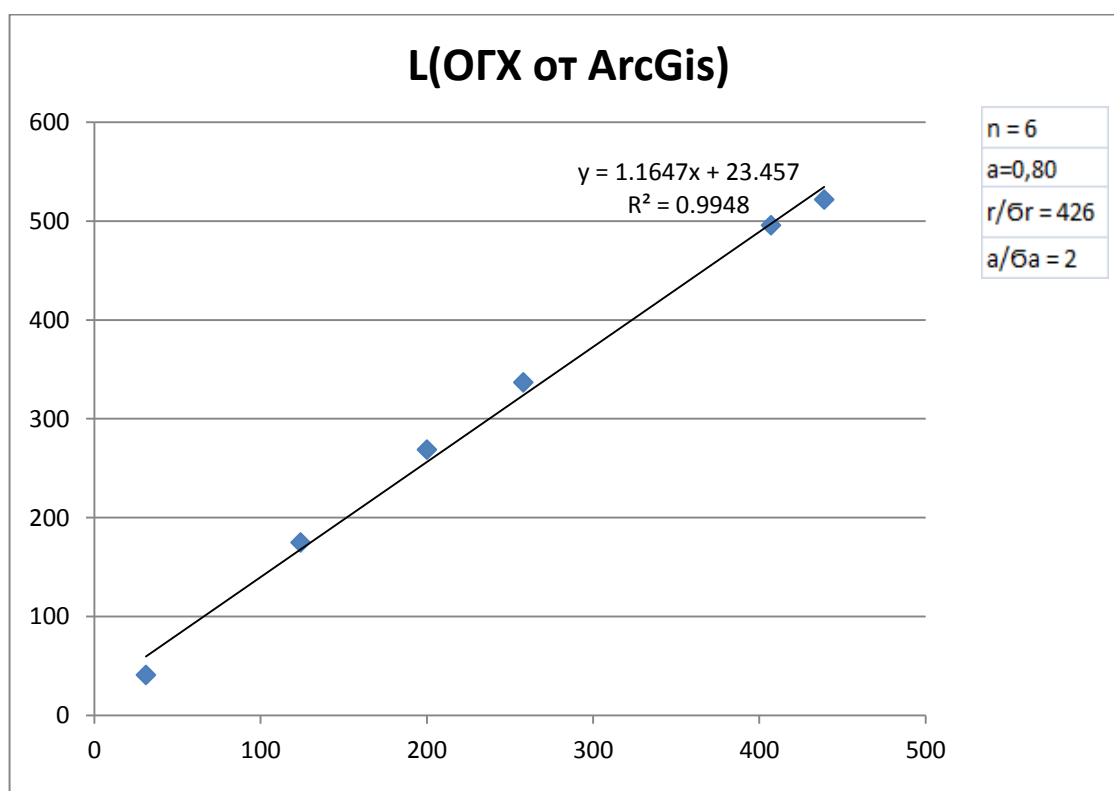


Рисунок 4.19 - Зависимость длины водотока по данным ОГХ от вычисленных значений в ArcGis

Анализ результатов определения средней высоты водосбора позволяет утверждать, что с ростом площади водосбора увеличивается погрешности определения.

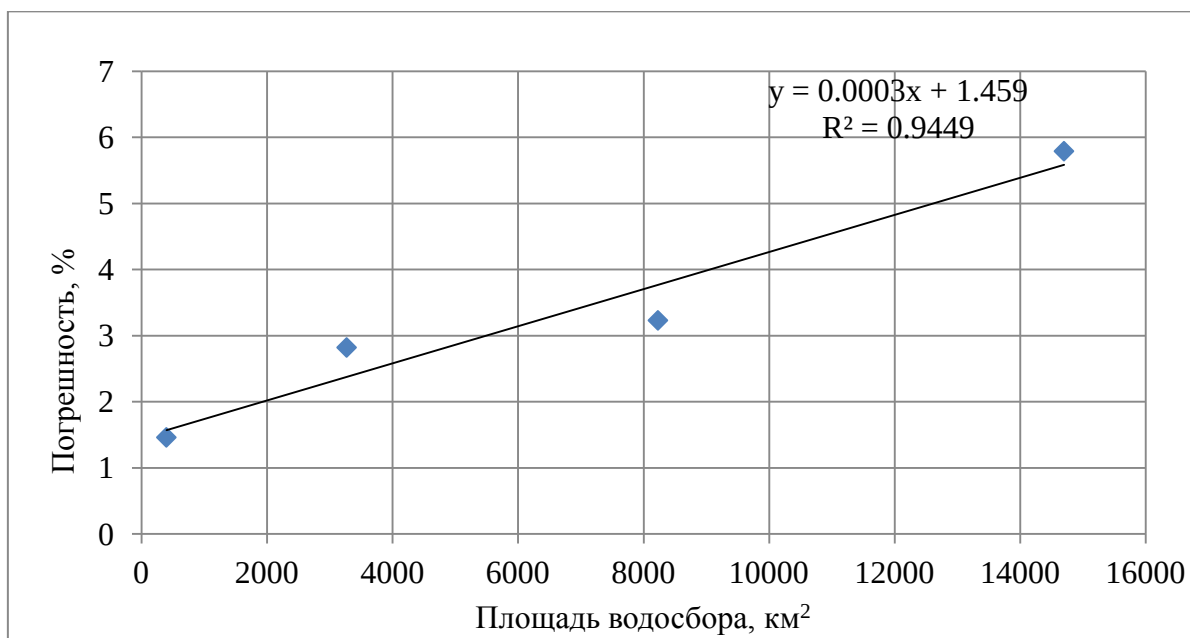
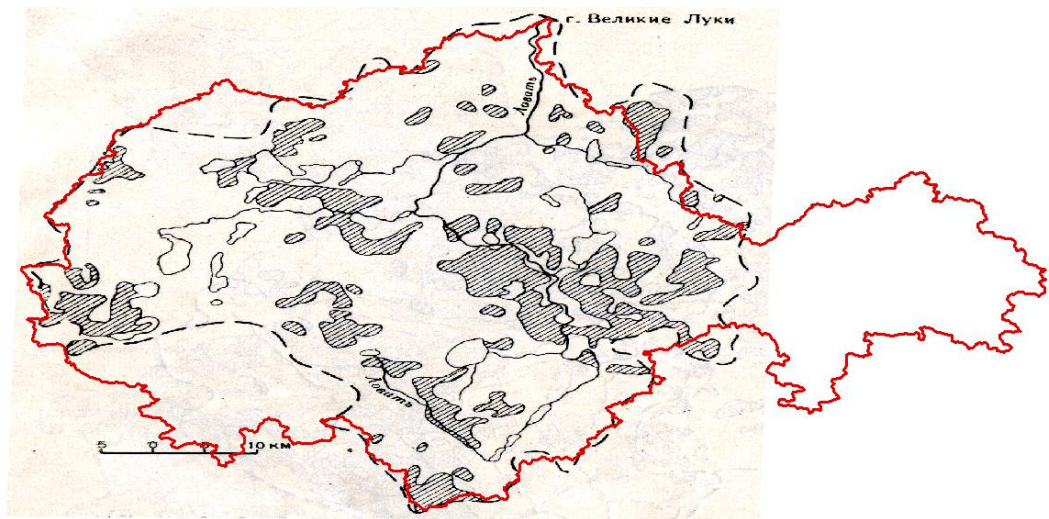


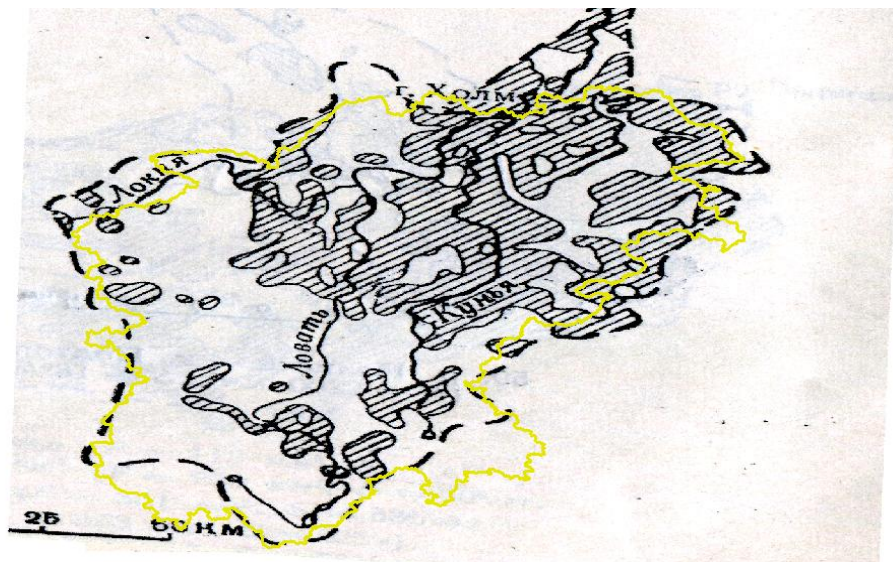
Рисунок 4.20 - Зависимость погрешности расчета средней высоты водосбора от размера водосбора

Для постов в г. Великие Луки и в г. Холм есть возможность сравнить полученные схемы водосборов с теми, что опубликованы в [9].

Результаты сравнения представлены на рисунке (4.21)



а)



б)

Рисунок 4.21 - Сравнение ранее опубликованных границ водосборов с построенными в ArcGIS: а) р. Ловать – г. Великие Луки;
б) р. Ловать – г. Холм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате осуществления поставленных задач цель проекта была достигнута: оценены морфометрические характеристики участков реки Ловать и их водосборов с помощью двух различных ГИС. Выполнено сравнение величин (площади водосборов, длины водотоков, средние высоты водосборов), вычисленных с использованием ArcGIS и ЦМР (SRTM), с результатами, полученными в программе MapInfo и с ранее опубликованными в ОГХ данными. Кроме этого, построены линии водоразделов, что позволило получить схемы 6 водосборов (ранее опубликовано только 2 схемы: для поста в г. Великие Луки и в г. Холм).

Наилучшее соответствие полученных результатов ранее опубликованными наблюдается для площади водосбора, определённой в программе MapInfo.

Пути развития исследуемой темы:

1. Совершенствовать владение инструментами программы
2. Привлекать соответствующие топографические основы для решения конкретно поставленных задач
3. Сотрудничать со специалистами, имеющими опыт работы с ГИС-технологиями

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Влацкий, В.В. Моделирование речного стока с использованием ГИС - технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://vestnik.osu.ru/2010_9/19.pdf/
2. Mapgroup: Что такое SRTM? Данные SRTM, и где скачать SRTM бесплатно?[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mapgroup.com.ua/articles/dzz/109-dannye-srtm-sposoby-polucheniya-dannykh/>
3. ArcGIS Resources: Примеры практического применения гидрологического анализа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#/009z0000005z000000/>
4. География Псковской области. Учебное пособие. Лениздат 1974год
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.veluki.ru>
6. Лесненко В.К. Природные ресурсы Псковской области, их рациональное использование.-Псков: ПГПИ, 2002.-136 с
7. Свободная энциклопедия Википедия: Великая (река, впадает в Псковское озеро)[Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Великая_\(река,_впадает_в_Псковское_озеро\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Великая_(река,_впадает_в_Псковское_озеро))
/
8. Государственный комитет Псковской области по природопользованию и охране окружающей среды: Поверхностные водные объекты[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://priroda.pskov.ru/poverkhnostnye-vodnye-obekty/>
9. Альбом гидрографических характеристик речных бассейнов европейской территории СССР. – Л., Гидрометеиздат, 1955. – 6-40 с.
- 10.Самохин А.А. Практикум по гидрологии / А.А. Самохин, Н.Н. Соловьева, А.М. Догановский. – Л: Гидрометеиздат, 1980 - С. 143-176.

- 11.Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. Л: Гидрометеиздат, 1990] - С. 34-35.
- 12.Журавкова, О. Н. Использование геоинформационных систем для подготовки и реализации плана управления водосборным бассейном р. Нарва и Чудского озера[Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://prj-pgri.narod.ru/prj_3_11.pdf/
13. ДеМерс М. Н. Географические Информационные Системы. Основы.: Пер. с англ. – М.: Дата+, 1999. – 489 с.
- 14.Favallia, M; Innocenti, F; Pareschia, M. T.; Pasquarè, G.; Mazzarinia, F.; Brancad, S.; Cavarraa, L.; Tibaldi, A.; The DEM of Mt. Etna: Geomorphological and structural implications, Geodinamica Acta, Volume 12, Issue 5, 1999, pp. 279–290.
15. Font, M; Amorese, D; Lagarde, J-L., DEM and GIS analysis of the stream gradient index to evaluate effects of tectonics: The Normandy intraplate area (NW France), Geomorphology, Volume 119, Issues 3–4, 2010, pp. 172–180.
- 16.Thurmonda, J. B.; Drzewieckib, P.A; Xua X., Building simple multiscale visualizations of outcrop geology using virtual reality modeling language (VRML), Computers & Geosciences, Volume 31, Issue 7, 2005, pp. 913–919.
- 17.Maune, D.F., Kopp, S.M., Crawford, C.A. & Zervas, C.E., 2007, Introduction, 2nd edn, Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM User's Manual, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland
- 18.Hutchinson, M.F., A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology, 106 (1989), pp.211-232.
- 19.Г. Г. Ерицяи Сравнение цифровых моделей рельефа, полученных с топографических карт масштаба 1:50000, 1:100000 И 1:200000 с ЦМР SRTM Известия НАН РА, Науки о Земле, 2013, 66, № 1, 39-47с.

20. A. K. Karwel, I. Ewiak, Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008, pp. 169-172.; То же [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://mapgroup.com.ua/>
21. Hydrolk [Электронный ресурс]: — Режим доступа: <http://globaldigital.elevationmodel.usgs.gov/products/elevation/hydrolk.html/>
22. Орлова Е.В. Применение ГИС-технологии для получения гидрологических характеристик водосбора Вилуйского водохранилища. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.izdatgeo.ru/pdf/gipr/2008-3/134.pdf/
23. НПО Гидротехнологии [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.hydrotec.ru/>
24. Андрианов В. Природные ГИС. ARCREVIEW. Современные геоинформационные технологии. Совместное издание ООО Дата+, ESRI, Inc. и Leica Geosystems, № 4 [39], 2006
25. Электронное правительство Псковской области: Перечень информационных систем [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.pskov.ru/realizacia-8fz/sistem/>
26. АВ Костин, А. В. Цифровая модель рельефа (Методы создания *5и направления использования) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://st-yak.narod.ru/pdf/20-5.pdf/>
27. ArcGIS Resources: Что такое цифровые модели рельефа [Электронный ресурс]. — Режим доступа: resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#//009z0000005n000000/
28. ESRICIS. Отрасли: Водные ресурсы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://esri-cis.ru/industries/natural-resources/water-resources/>