

Здесь будет титульный лист

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
	Введение	3
1	Физико-географическая характеристика	5
1.1	Общие сведения	5
1.2	Климатическая характеристика	6
1.3	Геологическое строение и рельеф	6
1.4	Озерность территории	7
2	Объекты исследования	11
2.1	Описание озер бассейна Балтийского моря	13
2.2	Описание озер бассейна Верхней Волги	16
3	Используемое программное обеспечение. ресурсы	22
3.1	Цифровая модель рельефа STRM	22
3.2	ArcGIS ArcMap 10.1: модуль анализа пространственной информации «Spatial Analyst» и инструменты модуля «Гидрология»	27
3.3	ArcGIS ArcMap 10.1: дополнительно используемые модули	33
3.4	SAS.Планета	34
4	Обработка исходных данных и анализ полученных результатов	38
4.1	Предварительный анализ	38
4.2	Работа с картой	41
4.3	Постройка водосбора водоёма	46
4.4	Определение площади водосборов	56
4.5	Анализ полученных результатов	58
	Заключение	70
	Список использованных источников	72

ВВЕДЕНИЕ

На Земном шаре по самым приближенным подсчетам 8-9млн озер. В России – 2,2 млн. озёр и более 2,5 тыс. водохранилищ.

Озера и водохранилища являются частью гидрографической сети и участвуют в большом круговороте воды в природе, замедляя водообмен между речными системами и океаном [1].

Однако, не смотря на то, что озёра имеют важное народно-хозяйственное значение, гидрологическая изученность и их самих, и их водосборов остаётся недостаточной. Использование ArcGIS – самого популярного приложения для создания геоинформационных систем (ГИС) – позволяет значительно улучшить сложившуюся ситуацию. ГИС-технологии и спутниковые данные применяются в различных областях прикладной гидрологии: дистанционный мониторинг прорывоопасных озер, исследование процессов снеготаяния, автоматизированное выделение элементарных участков при организации ландшафтно-экологического мониторинга, моделирование зон затопления, управление водными ресурсами и т.д.

Целью дипломного исследования является оценка возможности применения ArcGIS/ArcMap 10.1 и цифровой модели рельефа (ЦМР) STRM (*Shuttle radar topographic mission* – радарная топографическая съемка большей части территории земного шара, за исключением самых северных ($>60^\circ$), самых южных широт ($>54^\circ$), а также океанов), для надёжного определения площади водосбора водоёмов.

Актуальность исследования обусловлена недостаточной изученностью водоёмов и их водосборов: в настоящее время информация о характеристиках водосборов более 60% водоёмов либо отсутствует, либо недоступна.

Определение площади водосбора довольно трудоёмко, а использование современных средств облегчает получение недостающих характеристик.

Для достижения намеченной цели необходимо:

- выбрать объекты исследования;
- разработать алгоритм работы с необходимыми приложениями ArcGis;
- выявить систематические ошибки и проанализировать их возможные причины;
- оценить точность определения площадей водосборов водоёмов.

Единое информационное пространство, учитывающее гидрологические и географические особенности исследуемого водосбора, может быть построено на основе современных ГИС-технологий. Интеграционный характер геоинформационных систем позволяет создать мощный инструмент для сбора, хранения, систематизации, анализа и представления информации о состоянии водных объектов региона [2].

Причиной выбора ArcGis 10.1 послужило наличие в её центральном приложении ArcMap 10.1 модуля *Пространственный анализ*, в котором содержатся инструменты гидрологического моделирования. Инструменты группы *Гидрология* позволяют, среди прочего, идентифицировать приёмники стока и разграничивать водосборы [3].

Причиной выбора именно ЦМР SRTM стало то, что это готовая модель земной поверхности, которая не содержит растительного покрова, построек и водотоков. Эта ЦМР была создана на основе данных международной миссии, в ходе которой, в феврале 2000 г., с борта космического корабля многоразового использования с помощью радарной интерферометрической камеры и двух радиолокационных сенсоров была выполнена съемка поверхности Земли [4].

Выбранные для исследования озера и водохранилища находятся в восточной Эстонии, в Северо-Западном и Верхневолжском регионах РФ. Такой выбор обусловлен охватом ЦМР и большим количеством водоёмов.

1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Общие сведения

Исследуемая территория расположена в центральной и северо-западной части Восточно-Европейской равнины, между 55° и 60° с.ш. в широтном направлении и между 21° и 44° в.д. в меридиональном направлении. Находящиеся на этой территории водоёмы принадлежат бассейну Балтийского моря и бассейн р. Волга (верхнее течение); они расположены на Северо-западе России, в Республике Эстония и на Верхней Волге. В представленной работе исследован 51 водоём.

Границами Северо-запада Европейской части РФ являются: на севере – рр. Нева и Свирь, на востоке и юге – водоразделы с бассейнами Волги и Днепра. Гидрографически район полностью принадлежит бассейну Балтийского моря [5]. К этому же бассейну относится рассмотренная восточная часть территории Эстонии, примыкающая с запада к границам описанного выше района.

Верхневолжский район охватывает бассейн р. Волги до г. Чебоксары, большая его часть расположена в лесной зоне и только южная – в лесостепной. На севере граница проходит по водоразделу с бассейнами рр. Онега и Северная Двина, на западе – с бассейнами рр. Волхов, Западная Двина и Днепр, на востоке – с бассейном р. Вятка и правобережных притоков р. Волга, и на юге – с бассейном р. Дон [6].

Таким образом, территория, на которой находятся исследуемые водоёмы, разделена на два района, достаточно однородных географически и климатически: Северо-Западный и Верхневолжский.

1.2 Климатическая характеристика

Северо-запад

Климат района умеренно континентальный, влажный, со сравнительно холодной зимой и теплым летом; на климат большое влияние оказывает близость моря. Относительная влажность воздуха высокая – 75-85%. В восточной части района климат более континентален; зима длительная и довольно суровая. По направлению на запад, и особенно на юго-запад – к Балтийскому морю – климат становится более мягким и влажным. Средняя годовая температура воздуха от 2,4° С на северо-востоке до 6,8° С на юго-западе. Годовая сумма осадков колеблется от 500- 600 до 600-700 мм.[5]

Верхневолжский район

Климат в Верхневолжском районе переходный от умеренно континентального на западе к континентальному на востоке. В целом климатические условия района можно отнести к бореальному типу, характеризующемуся теплым летом и холодной снежной зимой.

Среднегодовая температура воздуха в пределах района изменяется от 1-3°С на северо-востоке до 10°С на юго-западе. В северной части района за год выпадает до 650 мм осадков; к югу и, особенно, к юго-востоку их количество резко уменьшается, до 300 мм.[5]

1.3 Геологическое строение и рельеф

Район представляет собой низменную равнину, преимущественно с высотами до 100 м над ур.м., среди которой встречаются более или менее возвышенные, всхолмленные участки с высотами до 250-320 м. На юге выделяется Валдайская возвышенность с высотами до 322 м, обрывающаяся высоким уступом (глинтом) в сторону Балтийского моря.

На формирование рельефа большое влияние оказало геологическое строение и тектонические особенности Русской платформы. Общая схема рельефа, сложившаяся в доледниковое время, была существенно преобразована обледенением четвертичного периода, в значительной степени определившим современные формы поверхности. Основное рельефоформирующее влияние оказала деятельность трех последних ледниковых покровов: днепровского, московского и валдайского. Границы оледенений во многих местах четко прослеживаются в рельефе. Ледниковые формы поверхности в разной степени преобразованы в ходе флювиальных и эрозионных процессов.[6;7]

1.4 Озёрность территории

1.4.1 Озёра Верхневолжского район

На северо-западе Верхневолжского района (бассейны Мологи, Суды и Шексны) типичны моренные возвышенности с песчаными холмами и грядами, большое число озёр и слаборазвитая эрозионная сеть. Большинство озёр сосредоточено в границах Валдайского оледенения. Озерные группы и отдельные озёра находятся также в пределах Верхневолжской, Костромской, Мещерской и Балахнинской низменностей. В западной, центральной и южной частях территории, в пределах зоны распространения известняков, доломитов и других карстующихся пород, распространены карстовые озера.

В поймах больших рек (Волги, Мологи, Шексны, Костромы, Унжи, Оки, Клязьмы) широко распространены озера-старицы.

По происхождению котловин озера территории подразделяются на ледниковые, речные и карстовые. Котловины большинства озёр сформированы под действием ледника или ледниковых вод.

Котловины ледниковых озёр обычно имеют вытянутую форму (часто сложную лопастную) и ориентированы в направлении движения ледниковых

потоков. Нередко к ледниковым относят озера, занимающие тектонические понижения, переработанные ледником (оз. Селигер), или котловины, образовавшиеся в результате подпруживания ледниковыми отложениями древних речных долин (оз. Плещеево).

Довольно распространены озера ложбинного типа, образованные в расширениях и углублениях, выработанных подледниковыми потоками. Такие озера представляют собой цепочки водоемов, как бы нанизанных на речную сеть. Размеры и глубины озер различны; морфология современных озерных чаш в значительной мере определяется степенью их заполнения илистыми отложениями, зарастанием и заболачиванием берегов.

В ряде случаев озерные группы и отдельные озера представляют собой остатки более обширных водоемов. В настоящее время такие озера располагаются среди крупных болотных массивов (Петровско-Оршинская группа, Шатурские озера, озера системы р. Пра и др.). Котловины этих озер на 40-90% заполнены илами, мощность которых может достигать 40м (оз. Сомино); в настоящее время глубины таких озер не превышают 10 м, а в большинстве случаев – 5м.

Карстовые озера Валдайской возвышенности, бассейна р. Шексна и озера северных окраин Среднерусской и Приволжской возвышенностей небольшие, округлые, со значительными, до 25-30 м, глубинами. Характерно, что наибольшие глубины озер ледникового происхождения нередко связаны с наличием карстовых воронок и провалов.

Речные озера обычно расположены в пределах пойменной террасы долины, имеют вытянутую или несколько искривленную вытянутую форму и небольшие размеры. Ширина таких озер определяется размерами русла реки на данном участке и обычно не превышает нескольких десятков метров. Глубины озер-стариц обычно 1.0-2.5м.

На реках района создано значительное количество водохранилищ. Наиболее крупные из них образуют каскад Верневолжских водохранилищ:

Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Шекснинское, Горьковское, Чебоксарское. К водохранилищам меньших размеров относятся: на р. Волга – Верхневолжское; в бассейне р. Москвы – Можайское, Рузское, Озернинское, Истринское; в системе канала им. Москвы – Яхромское, Икшинское и другие водохранилища водораздельного бьефа канала. Небольшие водохранилища созданы на Упе, Шате, Пахре и многих других реках. Повсеместно на малых реках района имеются русловые водохранилища ГЭС и бытового водоснабжения, а в лесостепной зоне около 1000 небольших прудов, используемых для задержания весеннего стока.[8]

1.4.2 Озера Северо-западного района

В целом, озёрность территории обычно составляет 1-3%, при этом общее число озёр превышает 5-6 тысяч; такое множество озёр обусловлено сравнительной «молодостью» современной поверхности рельефа, позже других районов освободившейся от ледникового покрова. Связь озёр с четвертичным оледенением подчеркивается почти полным совпадением южной границы озерной области с южным краем последнего оледенения. Развитости гидрографической сети также способствуют и современные физико-географические условия, характеризующиеся избыточным поверхностным увлажнением. Сравнительно слабо врезанная речная сеть еще не успела после отступления ледника понизить уровень озёр или выполнить наносами их котловины.

Преобладают озёра, образовавшиеся в результате аккумулятивной и эрозионной деятельности ледника. Котловины озёр приурочены, главным образом, к понижениям между моренными грядами и холмами или образованы в результате подпруживания речных долин ледниковыми отложениями. Большинство озёр небольшие, округлой формы, со слабо развитой береговой линией; они имеют плоские берега, небольшие глубины,

не превышающие, как правило, 5-10 м, и плоский рельеф дна. Дно часто покрыто мощными отложениями ила (сапропель).

Средние и малые озёра района. Особенно много озёр среди моренных возвышенностей: Валдайской, Невельско-Витебской, Судомской, Литовско-Белорусской и др. Из числа наиболее значительных можно отметить озеро Выртсъярв, расположенное на территории Эстонии.

В западной части Ленинградской области расположены оз. Черемнецкое и большие мелководные озёра Самро и Сяберское. Здесь же находятся две достаточно значительные группы озёр: Кингисеппская группа, включающая мелководные озёра Копанское, Глубокое, Бабинское и Хабаловское и группа озёр Кургаловского полуострова – Липовское и Белое.

Большое число озёр (Малый Вяз, Яское, Езерище и др.) расположено в верхней части бассейна р. Великой. Верховья Западной Двины также изобилуют озёрами, из которых наиболее значительными являются Охват-Жаденье, Жижицкое, Себежское, Освейское и Нарочь.

На побережье Финского залива расположен ряд лагунных озёр, образовавшихся в результате полного или частичного отчленения от него мелководных бухт и заливов. В местах близкого залегания к поверхности известняков встречаются озера карстового происхождения, котловины которых образовались в результате химического растворения пород.

Среди водоемов Северо-западного района довольно большую группу составляют озера болот и болотных массивов. Происхождение таких озёр связано с существованием болот; иногда их называют озёрами вторичного происхождения, подчеркивая этим связь с прежним озёром, на месте которого образовалось болото. Размеры и глубины этих озёр небольшие. Дно сильно заилено. Нередко моховой покров затягивает поверхность озёр, оставляя лишь местами небольшие открытые участки. Особенно много озёр такого типа среди болот Волхово-Ильменской низменности, в частности среди Полистовского болотного массива, расположенного в бассейне р. Полисть.[5]

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования был выбран 51 водоём: 15 озёр, принадлежащих бассейну Балтийского моря, а также шесть водохранилищ и 30 озёр, принадлежащих бассейну Верхней Волги. Из них 21 водоём по площади водосбора не превышает 150км², 23 имеют площадь от 150 до 1500км² и 7 более 1500км².

Таблица 2.1 Исследуемые водоёмы.

№	Название водоема	Площадь зеркала водоёма, км ²	Общая площадь водосбора, км ²
Бассейн Балтийского моря			
1	Валдайское оз.	19.7	97.2
2	оз. Ильмень	2090	67190
3	оз. Коробожа	6.4	1026.4
4	оз. Охват	13.6	585.6
5	оз. Пелено	3.8	28.3
6	оз. Песьво	6.6	127.6
7	оз. Сяберо	14.2	47.9
8	оз. Удомля	10.1	400.1
9	оз. Черемецкое	15	511
10	оз. Чудско-Псковское	3530	47730
11	оз. Черное (с. Велье)	0.14	13.94
12	оз. Вуртсыярв	270	3380

13	оз. Пюхаярх	2.86	46.46
14	оз. Харку	1.64	50.64
15	оз. Каруярв	3.3	15.8
Бассейн Верней Волги			
16	оз. Вялец	19	1.46
17	оз. Галичское	872	75.4
18	оз. Неро	1220	54.4
19	оз. Плещево	425	50.8
20	оз. Селигер	2310	212
21	оз. Сенеж (Сенежское)	69.2	8.9
22	оз. Чухломское	317.7	48.7
23	Верхневолжское вдхр.	3499	179
24	Иваньковское вдхр	41000	327
25	Истринское вдхр	991	27.4
26	Можайское вдхр	1360	31
27	Озернинское вдхр	738	23
28	Рузское вдхр	1143	33
29	Угличское вдхр	60000	249
30	оз. Истошня	127	1.52
31	оз. Заборовское	20.1	0.52
32	оз. Хвошня	106	2.16
33	оз. Скорбеж	71.8	2.7
34	оз. Сомино	488	1.8
35	оз. Савельево	25.2	0.44
36	оз. Кубыча	61.2	4.6

37	оз. Рогозино	434	1.56
38	оз. Перхово	633	3.0
39	оз. Молдино	92.2	5.16
40	оз. Сестрино	282	0.58
41	оз. Кезадра	120	8.7
42	оз. Павловское	421	0.8
43	оз. Иловец	78	5.24
44	оз. Меглино	192	24.2
45	оз. Еменец	109	0.7
46	оз. Вожанское	709	2.5
47	оз. Березорадинское	220	5.8
48	оз. Лидское	446	4.1
49	оз. Ракитинское	545	2.7
50	оз. Видимирское	118	4.8
51	оз. Граничное	443	2.2

2.1 Описания озёр бассейна Балтийского моря (номера соответствуют номерам в таблице 2.1)

1. Озеро Валдайское. Живописное озеро ледникового происхождения. Прилегающая местность холмистая, поросшая смешанным лесом, местами занята сельскохозяйственными угодьями. Склоны котловины высокие, крутые. Берега низкие, пологие, вдоль берегов дно зарастает [9]. Средняя глубина озера – 12 м, максимальная – 60 м. В средней части расположен остров Рябиновый, делящий озеро на два плёса. Валдайское озеро соединено с оз.

Ужин каналом «Копка», который был построен в 1862 г. на месте р. Федосеевка, длиной около 150 м.[10]

Из обоих озер вытекает одна река – Валдайка. Её длина 43 км, уклон русла составляет 37 м. В низовьях, перед впадением в оз. Пирос, течение Валдайки спокойное [11].



Рисунок 2.1 Озеро Валдайское

2. **Озеро Ильмень.** Послеледниковый водоём (на месте более ранних водных систем), длина около 45 км, ширина до 35 км; глубина до 10 м, средняя глубина 3-4 м. Берега преимущественно низменные, заболоченные, местами – дельтовые, с множеством плоских пойменных островов и протоков; вдоль северо-западного берега вытянуты гряды, чередующиеся с впадинами; на юго-востоке и востоке болотисты. В озеро Ильмень впадает около 50 рек. Вытекает р. Волхов.[12]

4. **Озеро Охват.** Прилегающая местность – волнистая равнина, заболоченная в пониженных местах и поросшая хвойным лесом. Берега извилистые, пологие, местами крутые, не затопляемые. Дно илистое, а у берегов – песчаное [9]. Озеро сильно вытянуто с северо-востока на юго-запад:

длина – 9.6 км, ширина от нескольких десятков метров до 1.5 км. Наибольшая глубина составляет 28 м, средняя глубина 6.3 м. Происхождение озера ложбинное. Из южной части вытекает р. Западная Двина [13].

5. Озеро Пелено. Окружено слабохолмистой равниной, поросшей лесом и частично заболоченной. Склоны озёрной котловины пологие, высотой до 8 м. Берега отлогие песчаные. Дно илистое, у берегов песчаное с камнями, поросшее растительностью [9]. Глубины до 8 метров. Озеро Пелено соединяется протокой Пеленовкой с оз. Люто. Длина этой протоки 5-6 км [14].

6. Озеро Песьво. Озеро имеет округлую форму с сильно изрезанными берегами. Наибольшая глубина 5.2 м, средняя глубина 2.7 м. На озере несколько небольших островов. На восточном берегу озера расположена Калининская АЭС. В западной части в озеро впадает р. Сьуча, в северо-восточной части находится протока в соседнее большое озеро Удомля. Через эту протоку осуществляется сток. Озёра Удомля и Песьво используются в качестве единого водоёма для водоснабжения АЭС [15].

8. Озеро Удомля. Озеро вытянуто с севера на юг, слабо изрезанное, соединяется протокой с оз. Песьво. Окружено слабохолмистой равниной с холмами высотой до 20 м. Понижения между холмами обычно заняты небольшими верховыми болотами. Берега пологие, высотой 2-3 м. Наибольшая глубина 30 м, средняя глубина 10 м. Дно озера неровное. Из озера вытекает р. Съежа. В её истоке построена плотина. В озеро впадает несколько небольших речек, в северную часть озера впадает протока из оз. Наволок.

10. Озеро Чудско-Псковское. Четвёртое по величине озеро в Европе. Трансграничный водоём, по акватории которого проходит граница между РФ и Эстонией. Состоит из трех обособленных частей со своими особыми характеристиками. Чудское озеро имеет площадь 2 670 км², среднюю глубину – 8 м, наибольшую – 12.4 м. Берега большей частью сухие, с песчаными пляжами и дюнами, поросшими сосной. Западный берег местами обрывистый,

каменистый. Из северной части вытекает р. Нарва. Псковское озеро почти в четыре раза меньше Чудского (710 км²), мелководное, средняя глубина 2.5-3 м, наибольшая – 5.4 м. Берега большей частью заболоченные. Чудское и Псковское озера соединяются протокой длиной 15 км, шириной 1.5-5 км, которая называется Теплым озером.



При сравнительно больших размерах, Чудско-Псковское озеро относится к числу мелководных водоёмов. Оно имеет плоское дно, выполненное мощным серым илом. Наибольшая глубина равна 14,6 м и расположена в самом узком месте Теплого озера [16].

На водосборе озера имеются как низменности (Псковская), так и возвышенности (Бежаницкая, Себежская). На нём расположено множество небольших озёр.

Рисунок 2.2 Водосбор оз. Чудско-

Псковское

2.2 Описания озёр и водохранилищ Верхней Волги (номера соответствуют номерам в таблице 2.1)

17. Озеро Галичское. Окружено группами холмов ледниково-моренного происхождения, которые отделены от котловины озера неширокой заболоченной низиной. Залесённость водосбора 71%. Вытекает р. Вёкса. Показатель водообмена $K=1.25$. Мелководно, 70% площади озера мельче 2 м. Берега мало изрезаны. Дно ровное, покрыто слоем сапропеля, средняя

толщина 4-6 м, наибольшая – 9 м. Значительная часть водной поверхности зарастает камышом, тростником и рогозом.[8]

18. **Озеро Неро.** Рельеф: группы холмов, разделенные пологими замкнутыми ложбинами. Смешанные леса занимают около 50% площади водосбора. Вытекает р. Которосль. Показатель водообмена $K=0.84$. Котловина блюдцеобразная с плоским дном. Берега пологие, низкие, высотой 0.3 м большей частью заболочены. Грунт дна: сапропель средней мощностью 5 м (наибольшая мощность до 20 м). До 3/4 водной поверхности зарастает рдестом, местами рогозом, у берегов тростником.[8]

19. **Озеро Плещеево.** Рельеф холмисто-равнинный, сложенный мореной и флювиогляциальными песками. Смешанные леса занимают около 30% водосбора озера, болота <1%; около 25% распаханно. Вытекает р. Вёкса. Показатель водообмена $K=0.14$. Котловина озера хорошо выражена, по берегам три уровня террас. Берега озера в пределах моренной гряды высокие, на остальном протяжении берега трех типов:

- низкие, с мелкой прибрежной зоной;
- приглубленные, с песчаным береговым валом;
- возвышенные, но с мелкой прибрежной зоной.

В прибрежной части озера до глубины 3-5 м распространены гравелисто-песчаные и песчаные отложения, далее черные и оливковые илы, мощность их не известна. Вдоль берегов расположена полоса тростника, камыша, хвоща, рогоза, рдеста, стрелолиста, кубышки шириной 100-350 м. [8]

20. **Озеро Селигер.** Рельеф прилегающей местности ледниково-аккумулятивный; моренные гряды чередуются с флювиогляциальными понижениями. Смешанные леса занимают около 50% водосбора, болота – 18%. Вытекает р. Селижаровка. Котловина местами плохо выражена. Форма

озера сложная, многоплёсовая (обычно выделяют семь основных плёсов),



Рисунок 2.3 Озеро Селигер

Берега разнообразные, на отдельных участках высокие, крутые, но местами низкие и заболоченные. Полупогруженная растительность расположена несплошной полосой вдоль берегов; на отдельных участках погруженная растительность. Грунт дна различен в различных плёсах: от сапропеловых илов мощностью 2-4 м до отложений песка, глины, ила. [8]

21. Озеро Сенеж (Сенежское). Рельеф: чередование крупных холмов значительной высоты и глубоких котловин. Леса смешанные, занимают 50% водосбора. Озеро представляет собой искусственный водоем, образованный в русле р. Сестра, которая из него вытекает. Показатель водообмена $K=0.39$. Берега высокие, крутые, часто обрывистые, высотой 3-5 м; в юго-восточной части озера умеренно пологие. Узкая полоса тростника, рогоза, осоки, рдеста, хвоща, лишь местами в заливах до 200 м шириной. Дно в прибрежной полосе покрыто песком, торфом, в центральной части – слоем ила толщиной 0.5-1.5м. [8]

22. Озеро Чухломское. По своему внешнему виду и незначительной глубине и растительностью очень похоже на Галичское, однако оно округлое, длиной 9.3 км и наибольший шириной 8 км. Берега пологие, спускаются к озеру с южной и западной стороны через высокую болотистую полосу с замытыми кое-где следами старых берегов. Дно озера на несколько метров

покрыто тонким илом. Наибольшая глубина 4.5 м, средняя глубина около 1.5 м. [17]

30. **Озеро Истошня.** Рельеф водосбора холмисто-грядовый с отдельными заболоченными ложбинами; леса занимают около 75% площади. Вытекает р. Руна. Показатель водообмена $K=12.3$. Берега озера почти на всём протяжении пологие, заболоченные, поросшие луговоболотной и кустарниковой растительностью. Вдоль уреза полоса тростника, камыша, кувшинки, рдеста шириной 50-200м. Грунт дна – ил. [8]

32. **Озеро Хвошня.** Рельеф холмисто-грядовый с наличием заболоченных низин. Смешанные леса занимают около 75% площади водосбора. Вытекает р. Мешток. Показатель водообмена $K=4.7$. Котловину образуют пологие склоны холмов и гряд. Берега озера разнообразные, преимущественно пологие, высотой 1-2 м, заболоченные, но местами крутые, высотой до 4-5 м. Вдоль уреза камыш, тростник, рдест, кувшинка, элодея шириной 10-50м местами 100-200м. Дно покрыто мощным слоем озерного ила, у берегов песок. [8]

36. **Озеро Кубыча.** Рельеф в основном равнинный с отдельными небольшими повышениями на юге и западе водосбора. Южная и восточная часть бассейна сильно залесены, северная и западная части заняты сельскохозяйственными угодьями, местами заболочены. Вытекает р. Кубыча. Показатель водообмена $K=0.67$. Северо-западные склоны озерной котловины умеренно крутые, южные крутые, в остальной части пологие. Берега преимущественно пологие, местами заболочены, на отдельных участках высокие. Всё дно покрыто илом. Вдоль уреза полоса тростника, камыша, хвоща, кувшинки, рдеста (40-60 м, в заливах до 100-150 м). [8]

37. **Озеро Рогозино.** Рельеф холмисто-равнинный, в понижениях между холмами заболоченные низины и занятые озерами котловины. Леса занимают большую часть бассейна. Вытекает р. Волчина. Показатель водообмена $K=12.5$. Котловина озера ложбинообразная. Западный берег высокий,

незатопляемый; восточный низкий, почти полностью заболочен. Дно в прибрежной зоне покрыто песчано-гравелистыми отложениями, в глубоководной – слоем ила толщиной около 1 м. В прибрежной зоне полоса камыша, тростника, осоки, хвоща, рдеста шириной 50-120 м. [8]

38. Озеро Перхово. Озеро окружает слабохолмистая равнина. Смешанные леса покрывают незначительную часть бассейна, болота встречаются только в поймах рек, распаханность значительная. Вытекает р. Волчина. Показатель водообмена $K=6.33$. Котловина озера ложбинообразная, хорошо выраженная. Преобладают крутые берега, высотой 2-5 м, в юго-восточной части умеренно пологие. Грунт дна: песок, галька, центральная часть заилена. Вдоль уреза полоса рогоза, камыша, кубышки, рдестов (ширина 10-20 м, местами в заливах до 100-150 м). [8]

39. Озеро Молдино. Рельеф бассейна холмистый, в понижениях заболоченные низины и озёра; залесенность 50%. Вытекает р. Молдинка. Показатель водообмена $K=0.66$. Котловина ложбинообразная. Берега преимущественно высокие, умеренно крутые, незатопляемые; в южной части озера местами пологие, низкие, заболоченные. Всё дно покрыто илом. Озеро является ёмкостью для водоснабжения Молдинской ГЭС. [8]

40. Озеро Сестрино. Окружающий рельеф холмистый, в понижениях расположены заболоченные низины. Смешанные леса занимают около 70% водосбора. Вытекает протока в оз. Волчино. Показатель водообмена $K=22.3$. Котловина ложбинообразная, берега незатопляемые, крутые, высокие (2-5 м). Дно покрыто слоем ила до 5 м. Около 70% акватории озера занято водной растительностью. Полоса прибрежной растительности (камыша, осоки, тростника, кубышки) от 20 до 100 м, в заливах сплошное зарастание. [8]

41. Озеро Кезадра. Рельеф: чередование моренных гряд и холмов с ложбинами и плоскими заболоченными равнинами. Хвойные и смешанные леса занимают около 60% водосбора, заболоченность около 7%. Вытекает р. Кеза. Показатель водообмена $K=0.48$. Котловина озера слабовыраженная.

Берега преимущественно пологие местами крутые, от 3 до 10 м. В прибрежной полосе преобладают песчаные грунты, а в глубоководной части озера ил. На участках низменных заболоченных берегов полоса камыша, тростника, рогоза шириной от 3 до 50-80 м. [8]

43. Озеро Иловец. Рельеф: чередование моренных гряд и холмов с ложбинами и плоскими заболоченными равнинами; хвойные и смешанные леса занимают около 50%. Водосбора. Вытекает р. Иловец . Показатель водообмена $K=2.3$. Котловина озера плохо выражена, берега на всем протяжении плоские, пологие, заболоченные, у западного берега – сплавина. Дно покрыто илистыми отложениями значительной толщины по всей площади. В прибрежной части полоса камыша, тростника, хвоща, кувшинки, рдеста (60-200 м шириной). [8]

23 Верхневолжское водохранилище образовано в 1843 г. в результате подпора плотиной на Волге Верхневолжских озёр (Тверская обл.). Одно из первых больших водохранилищ в России. Объём 0.52 км^3 , длина 85 км, наибольшая ширина 6 км. Регулирует сток и улучшает условия судоходства на Верхней Волге, используется для водоснабжения [18].

26. Можайское водохранилище. Полезный объём 221 млн м^3 , площадь 30.7 км^2 . Ширина до 3.5 км, длина около 47 км, глубина до 22.5 м. Служит для водоснабжения Москвы и для многолетнего регулирования стока р. Москва.[19]

3 ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. РЕСУРСЫ.

3.1 Цифровая модель рельефа SRTM.

Для определения морфометрических характеристик водосборов водоёмов расчетным путем за основу была взята цифровая модель рельефа (ЦМР). ЦМР – это растровое представление непрерывной поверхности. Точность ЦМР определяется, в первую очередь, разрешением (расстояние между точками образца – длина и ширина одного пикселя растра). Кроме того, на точность влияет тип данных (целочисленные или с плавающей точкой) и фактическая выборка поверхности при создании оригинальной. Максимально точная модель получается при построении по данным воздушного и наземного лазерного сканирования. [20]

На данный момент наиболее распространенными являются ЦМР на основе ячейки. Они используются в качестве входных данных для компьютерной количественной оценки характеристик земной поверхности.

Необходимым условием получения модели рельефа по данным воздушного лазерного сканирования является проведение полного комплекса аэросъемочных работ, включающих лазерную локацию и аэрофотосъемку (при необходимости создания текстурированной модели), а также камеральных работ по классификации и регуляризации (при необходимости создания регулярной модели) точек лазерных отражений, трансформированию и нарезке снимков, созданию триангуляционных моделей рельефа и их текстурированию (при необходимости создания текстурированной модели) [21].

Цифровая модель является полностью трёхмерным отображением реального рельефа местности (рисунок 3.1) на момент производства

аэросъемочных работ, что позволяет использовать его для решения следующих прикладных задач:

- вычисление уклонов и экспозиции склонов, что важно в строительстве дорог и продуктопроводов, сельском хозяйстве при выборе полей под культуры с разными требованиями к освещенности и др.;
- анализ поверхностного стока на территории;
- моделирование затопления территорий;
- анализ видимости, который используют при планировании коммуникационных сетей, в военном деле и других отраслях;
- ортокоррекция изображений;
- измерение площадей и объемов, получение профилей поверхности;
- просмотр данных в трёх измерениях.

Для решения таких задач требуются цифровые модели рельефа с различной плановой и высотной точностью. Источниками информации для построения ЦМР служат топографические карты, стереопары аэро- и космических снимков, данные радиолокационной съемки и т.п. На точность построения рельефа оказывают влияние пространственное разрешение и геометрическое качество изображений, состояние атмосферы, масштаб карты, точность опорных точек и др.

Обычно первичные данные существуют или, с использованием тех или иных операций, приводятся к одному из двух наиболее широко распространенных представлений поверхностей (полей) в ГИС: растровому представлению (модели) или модели нерегулярной триангуляционной сети (TIN).

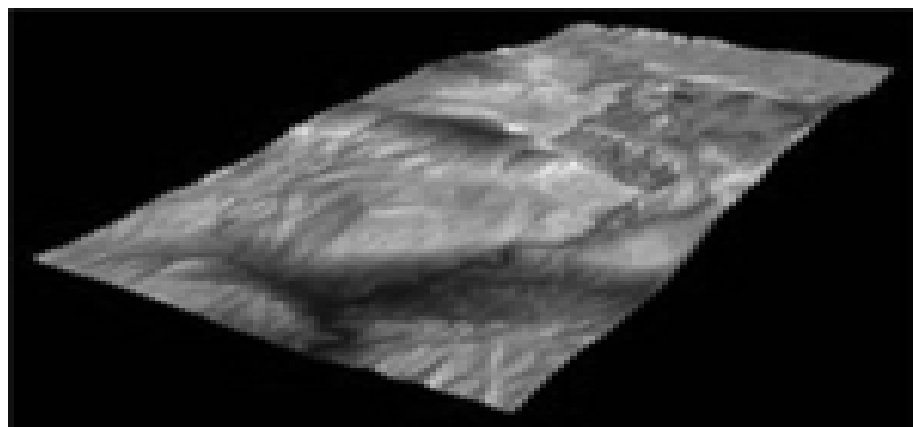


Рисунок 3.1 Пример цифровой модели рельефа.

Растровая модель пространственных данных – разбиение пространства (изображения) на далее неделимые элементы (пиксели) – относительно ЦМР обозначает матрицу высот: регулярную, обычно квадратную, сеть высотных отметок в её узлах, расстояние между которыми (шаг) определяет её пространственное разрешение. Именно таковы ЦМР, создаваемые национальными картографическими службами многих стран (например, Национальная ЦМР США в формате DEM, подготовленная Службой геологии, геодезии и картографии США (USGS)). Преимущество такой модели в удобстве ее компьютерной обработки. Регулярная сеть (решетка) применительно к представлению рельефа называется «грид» (grid). К растровой (матричной или регулярной модели) путем интерполяции, аппроксимации, сглаживания и иных трансформаций могут быть приведены ЦМР всех иных типов. [22].

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].

Shuttle radar topographic mission (SRTM) – радарная топографическая съемка большей части территории земного шара (за исключением самых северных ($>60^\circ$ с.ш.), самых южных широт ($>54^\circ$ ю.ш.), а также океанов), произведенная за 11 дней в феврале 2000 г. с помощью специальной радарной системы с борта космического корабля многоразового использования «Шаттл» (рисунок 3.2). Двумя радиолокационными сенсорами SIR-C и X-SAR было получено более 12 терабайт данных (что примерно равно объему информации Библиотеки Конгресса США).

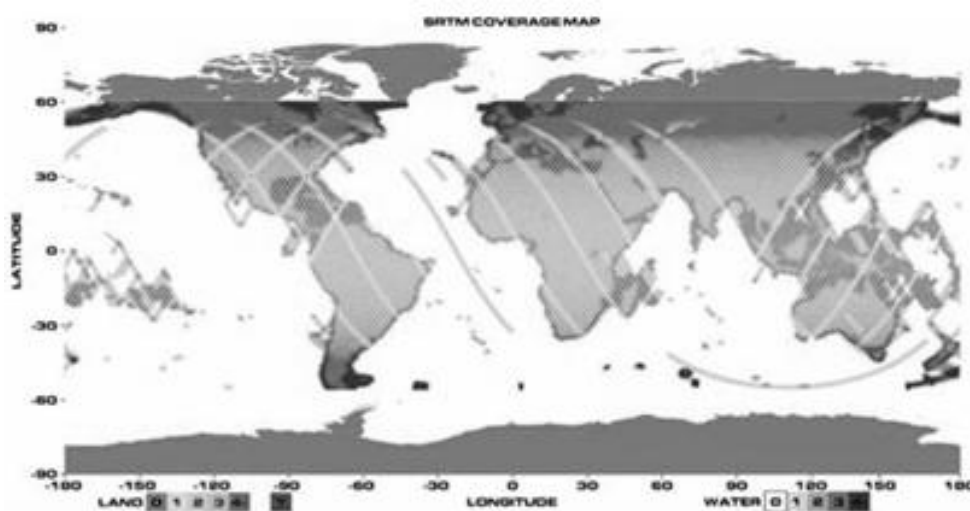


Рисунок 3.2 Территория охвата SRTM

В последнее время с помощью радарной съёмки было собрано огромное количество информации о рельефе Земли, её обработка продолжается до сих пор. Но определённое количество информации уже доступно пользователям. Матрица SRTM с размером ячейки 3×3 угловых секунды (~ 90 м) является общедоступной.

Данные SRTM существуют в нескольких версиях: предварительные (версия 1, 2003 г.) и окончательная (версия 2, февраль 2005 г.). Окончательная версия прошла дополнительную обработку: выделение береговых линий и водных объектов, фильтрация ошибочных значений. Данные

распространяются в виде сеток с размером ячейки 1 угловая секунда (~30 м) и 3 угловые секунды (~90 м). Более точные односекундные данные (SRTM1) доступны для территории США, на остальную поверхность Земли доступны только трехсекундные данные (SRTM3). Файлы данных представляют собой матрицу из 1201x1201 (или 3601x3601 для односекундной версии) значений, которая может быть импортирована в различные программы построения карт и ГИС.

Кроме того, существует версия 3, распространяемая в виде файлов ARC GRID, а также ARC ASCII и в формате Geotiff, квадратами 5x5 секунд во Всемирной системе геодезических параметров Земли 1984 г. (World Geodetic System 1984 (WGS84)). Эти данные получены из оригинальных высотных данных USGS/NASA путем обработки, обеспечившей получение гладких топографических поверхностей, а так же интерполяцию областей, в которых отсутствовали исходные данные. Данные находятся в свободном доступе на сайте USGS.

Данные SRTM могут применяться для оценки сложности предстоящих топографо-геодезических работ, планирования их проведения, а также могут быть полезны при проектировании расположения профилей и других объектов ещё до проведения топосъемки.

Полученные по результатам радарной съемки SRTM значения превышений точек местности могут быть использованы для обновления топоосновы территорий, где отсутствуют данные детальных топографо-геодезических работ [24].

3.2 ArcGIS ArcMap 10.1: модуль анализа пространственной информации «Spatial Analyst» и инструменты модуля «Гидрология»

ArcGIS – семейство программных продуктов американской компании ESRI, одного из лидеров мирового рынка геоинформационных систем. ArcGIS позволяет представить в виде цифровой карты большие объёмы статистической информации, имеющей географическую привязку. В среде создаются и редактируются карты всех масштабов: от планов земельных участков до карты мира. Также в ArcGIS встроен широкий инструментарий анализа пространственной информации.

ArcGIS используется в самых различных областях, в том числе и в науках о Земле: экология, лесное хозяйство, водные ресурсы, дистанционное зондирование Земли, геология и недропользование, геодезия, картография, география.

Модуль ArcGIS Spatial Analyst/Hydrology (Гидрология) – это набор моделей данных и инструментов анализа геопространственных и временных данных. В сочетании с общей средой программирования эти компоненты представляют собой стандартную базу данных и набор инструментов для распространенных видов анализа водных ресурсов. Spatial Analyst/Hydrology обладает функциональными возможностями, которые можно расширять, добавляя в базу данных структуры и функции, необходимые для выполнения определенных задач или работы с соответствующими приложениями. В результате оказывается возможным:

- выделять водосборные бассейны в растровом и векторном формате и получать их характеристики;
- определять и анализировать элементы гидрографических сетей;
- управлять временными сериями данных;

- настраивать и экспортировать данные в числовые модели.
- Используя растр высоты или ЦМР в качестве входных данных, возможно автоматически определить дренажную систему (рисунок 3.3) и выявить характеристики системы.

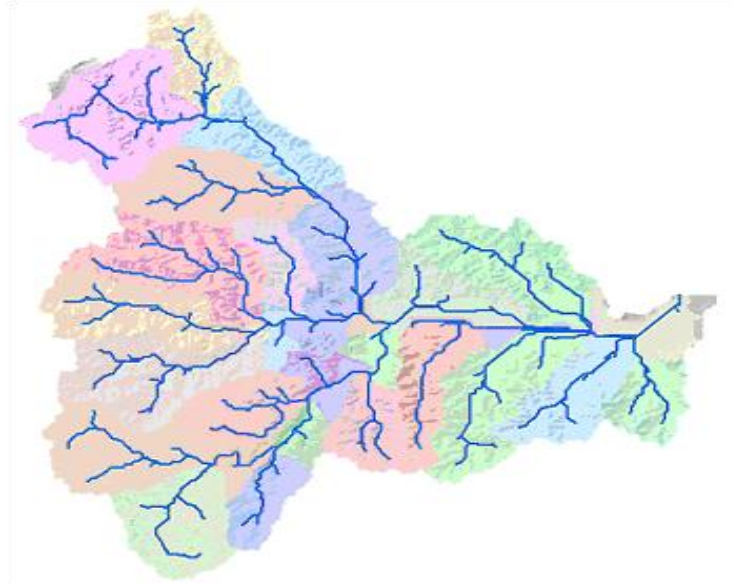


Рисунок 3.3 Пример сети водотоков, полученных на основе модели рельефа.

Инструменты модуля *Гидрология*

3.2.1 Выбирается ЦМР территории, на которой располагается исследуемый водоём (рисунок 3.4).

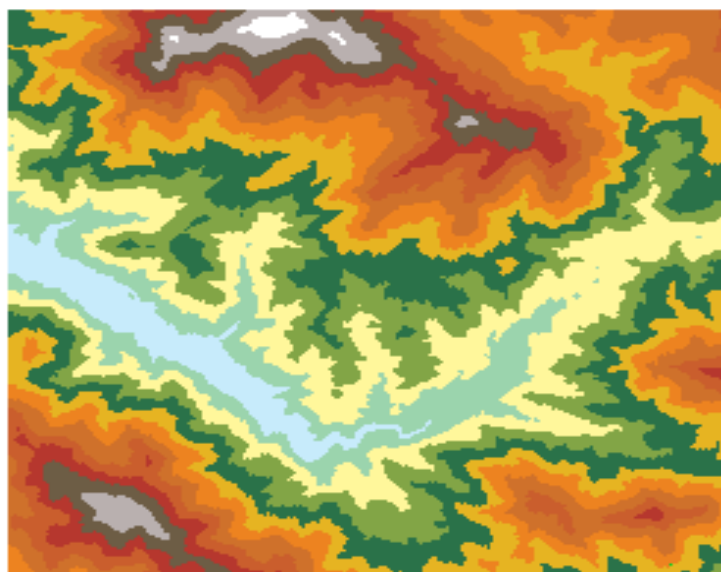


Рисунок 3.4 Входная поверхность ЦМР.

3.2.2. При использовании ЦМР в качестве входных данных инструмента *Направление стока* (Flow Direction) определяется направление, в котором вода вытекает из каждой ячейки (рисунок 3.5).

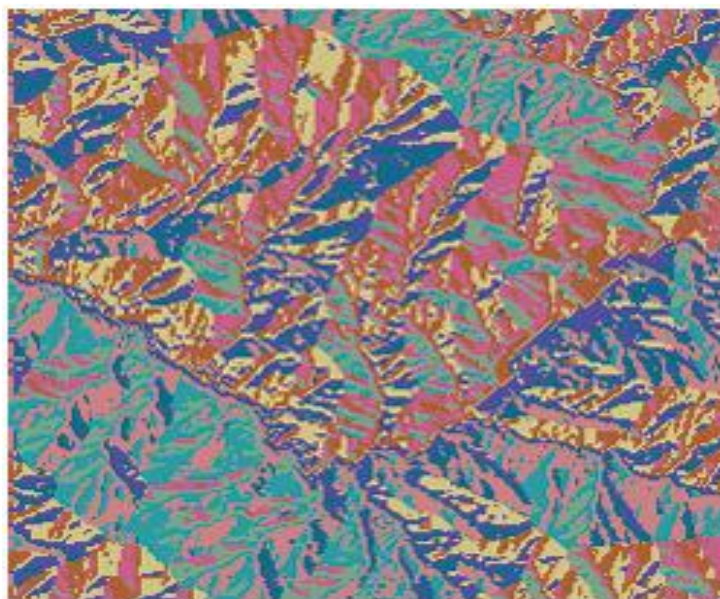


Рисунок 3.5 Определение направления стока.

3.2.3. 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 (рассеянные цветные точки), являются проблематичными, т.к. вода, попадающая в них, не может выходить наружу. Чтобы обеспечить надлежащее картирование дренажной сети, эти локальные понижения нужно заполнить с помощью инструмента *Заполнение локальных понижений* (Fill) (рисунок 3.6).

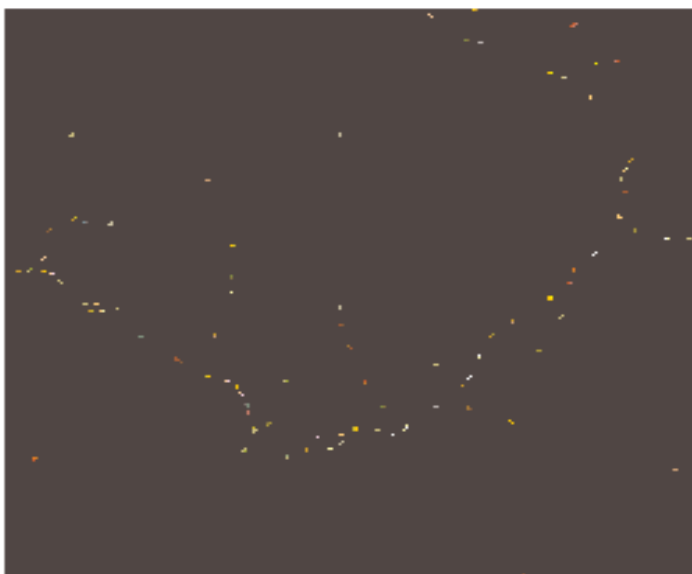


Рисунок 3.6 Определение локальных понижений

3.2.4. С помощью инструмента *Водораздел* (Watershed) очерчиваются водоразделы для заданных местоположений (рисунок 3.7).



Рисунок. 3.7 Определение водоразделов.

3.2.5. Для создания сети 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.

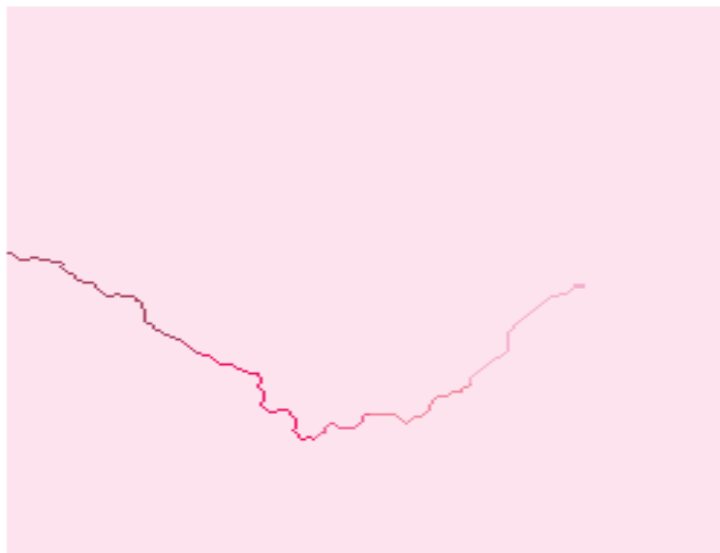


Рисунок 3.8 Выходные данные суммарного стока

3.2.6. Порог может быть задан на растре, полученном после использования 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 (рисунок 3.8).

3.2.7. Чтобы представить порядок каждого сегмента в сети, применяют инструмент *Порядок водотоков* (Stream Order). Для упорядочения водотоков (рисунок 3.9) применяются технологии Шреве и Страхлера.

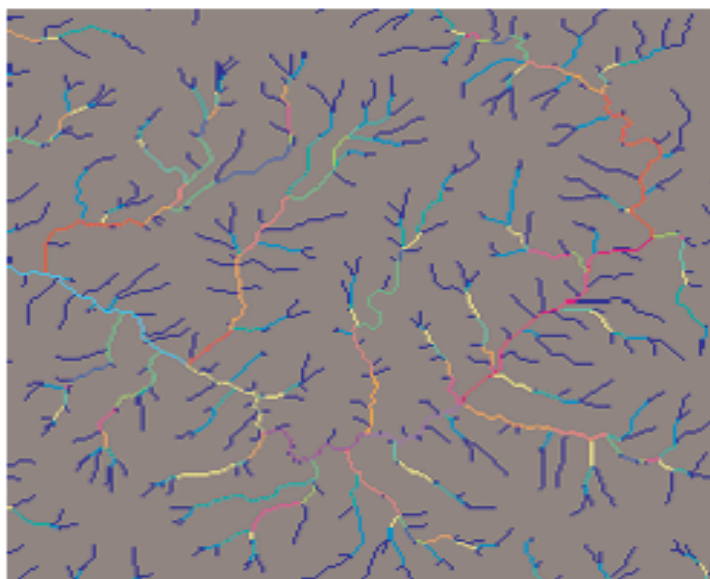


Рисунок 3.9 Выходные данные упорядочения водотоков.

3.2.8. 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 (рисунок 3.10). Это полезно для вычисления времени перемещения воды через водораздел.



Рисунок 3.10 Выходные данные длины линии стока.

3.3 ArcGIS ArcMap 10.1: дополнительно используемые модули

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

3.3.1. *Конвертация* (Conversion). Если для анализа требуется конвертировать растровые данные в векторные, то можно воспользоваться инструментом *Конвертация* (Conversion), причем это может быть полигон, шейп-файл или данные САПР. Также возможно обратное преобразование. Для конвертации набора растровых данных в полигональные пространственные объекты применяется инструмент *Растр в полигоны* (Raster to Polygon), хранящийся в наборе инструментов.

3.3.2 *Управление данными* (Data Management). Инструмент *Мозаика в новый растр* позволяет объединять отдельные куски карты в одну.

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.

Инструмент *Проецировать* (Project) позволяет изменять привязку объекта к определенной системе координат, будь то СК-42 или GCS_WGS_1984. Это необходимо для правильного наложения слоев растровых изображений разрабатываемого проекта.

3.3.3. *Пространственная статистика* (Spatial Statistics Tools). Инструмент *Вычислить площадь* (Calculate Areas) позволяет вычислить площадь полигона водосбора, полученного после конвертации растра в полигон или его выделения вручную.

3.3.4. *3D Анализ* (3D Analyst). Для определения уклонов необходимо воспользоваться инструментом *Профиль стека* (StackProfile), который входит в набор инструментов

3.3.5 *Изолинии по значениям* (Spatial Analyst) построение горизонталей, по заданным значениям высот. Дает возможность построить горизонтали с любым шагом и оценить форму рельефа.

3.4 SAS.Планета

SAS.Планета (SASPlanet) – программа свободного доступа, предназначенная для просмотра и загрузки спутниковых снимков высокого разрешения и обычных карт, предоставляемых такими сервисами, как Google Earth, Google Maps, Bing Maps, DigitalGlobe, «Космоснимки», Яндекс.Карты, Yahoo! Maps, VirtualEarth, Gurtam, OpenStreetMap, eAtlas, iPhone maps, карты Генштаба и др.. Но в отличие от этих сервисов, карты скачанные с помощью SAS.Планета остаются на компьютере, и для их дальнейшего использования не нужен доступ к Интернету.

Карту можно загрузить как выделением некоторой области (возможно непрямоугольной), так и в процессе перемещения по карте. Карты часто обновляются и можно использовать самые новые.[25]

Масштабная шкала условно делится на 24 диапазона (ступени) – от 1 (самый мелкий масштаб) до 24 (самый подробный). Каждому диапазону соответствует определённое разрешение космоснимка. Чем больше значение z , тем выше разрешение снимка. Разрешение при значении z_{14-15} , соответствует 10м/пиксель. z_{18} соответствует разрешению снимка менее 1 метра/пиксель (~ 0.7 м/пиксель).[26]

Алгоритм работы с ПО SAS Планета

1. На первом этапе выбираются карты. В нашем случае это Спутник (Яндекс.Карты). Затем выбираем *операции с выделенной областью/Прямоугольная область* и выделяем исследуемый участок (рисунок 3.11).

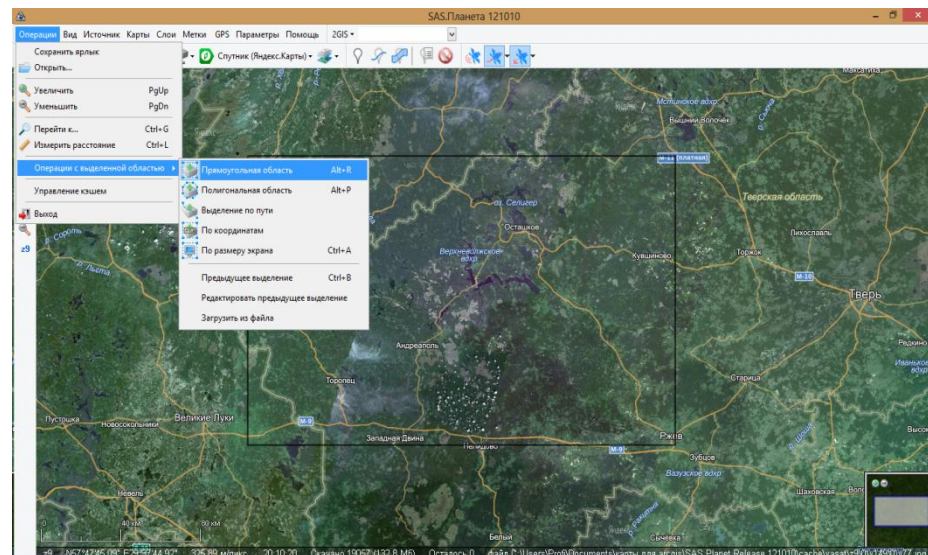


Рисунок 3.11 Выделение нужной части карты

2. В открывшемся окне выбираем масштаб сохраняемой карты, учитывая необходимую подробность, в нашем случае это z14-z15, что соответствует разрешению от 10 м/пиксель, и начинаем загрузку космоснимка. Загрузка идёт в виде так называемых тайлов (от англ. *tile* – плитка) – фрагментов карты размером 256x256 пикселей. Эти фрагменты записываются в соответствующий подкаталог папки *cache*. Для каждого сервиса предусмотрен свой подкаталог; для Яндекса, например, это *yasat* (рисунок 3.12), для Google'a – *sat* и т.д. Время загрузки зависит, в основном, от площади выбранной области.

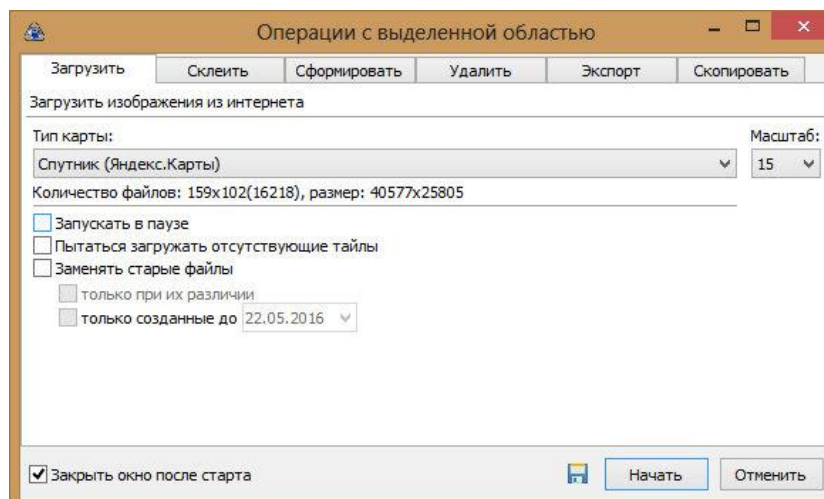


Рисунок 3.12 Окно загрузки.

3. После завершения загрузки скаченные файлы необходимо объединить. Для этого нужно снова открыть окно «*Операции с выделенной областью*», либо использовать *Операции/Операции с выделенной областью/Предыдущее выделение*, либо зажав на клавиатуре CTRL+B. Для сохранения лучше создать отдельную папку в которую можно будет поместить все, позднее создаваемые карты. Масштаб выбираем тот же – z15. При выполнении операции «*Наложить*» можно добавить «Гибрид (Яндекс.Карты)» с названиями объектов. «*Создавать файл привязки*» – выбираем все; это поможет при наложении карт в ArcMap. Нажатием «*Начать*» завершаем загрузку необходимой карты (рисунок 3.13).

Для загрузки другой карты не нужно выделять новую область. На первом этапе нужно изменить источник карт. Затем зажимаем CTRL+B для работы с предыдущим выделением (рисунок 3.14).

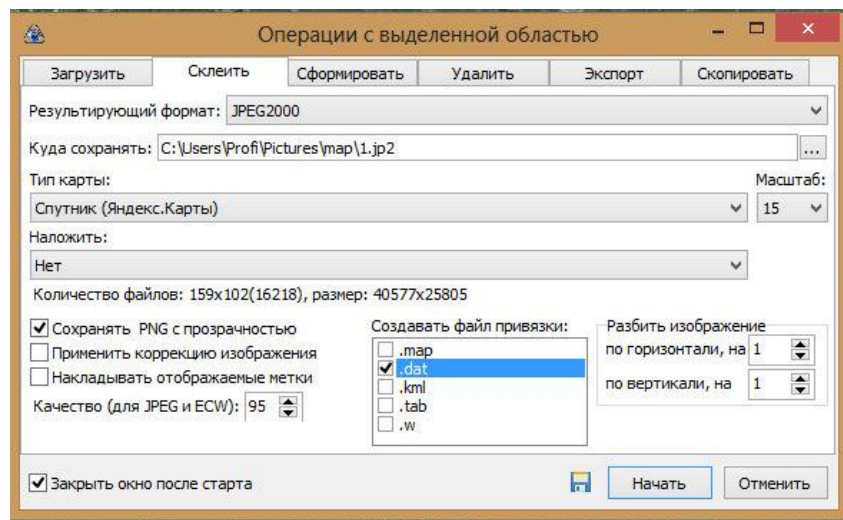


Рисунок 3.13 Окно «склейки» карты.

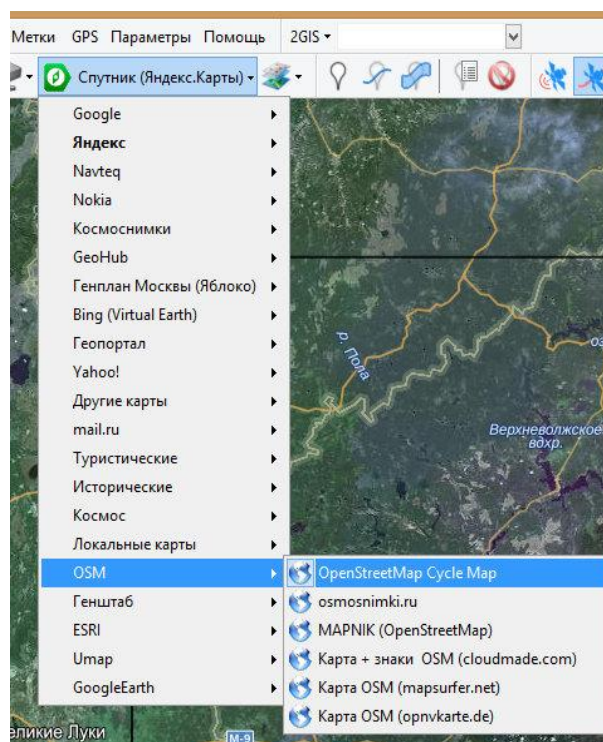


Рисунок 3.14 Выбор карты для загрузки.

На последующих этапах меняется только тип карты. По завершению скачивание тайлов, выделенный контур можно сохранить нажатием соответствующей клавиши, тогда к нему можно будет вернуться в любой момент.

4 ОБРАБОТКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.

4.1 Предварительный анализ

Одной из задач дипломного проекта был выбор водных объектов. Первым условием стало ограничение по широте местности, связанное с тем, что ЦМР STRM, имеющиеся в свободном доступе, ограничены 60° с. ш. Из-за этого объекты, находящиеся севернее, не могли быть использованы. Вторым ограничивающим условием стало отсутствие данных о площади водосборов: в официальных источниках эта характеристика отсутствует практически у 60% озер. Третье условие выбора – размер; озера в большинстве имеют небольшую площадь водосбора, что могло повлиять на результат. И последнее: пришлось исключить озера с самым популярным названием – «Глубокое», поскольку такая популярность усложняла определение точного местонахождения озера.

Для нахождения водоема на карте, не имеющей никаких опознавательных знаков, с электронного ресурса Яндекс.Карты были сняты относительные координаты приблизительного местонахождения водоёмов в виде десятичных градусов, чтобы найти ориентировочное место расположения озера. Координаты такого вида были необходимы для создания таблицы в Microsoft Excel (таблица 4.1), которую можно использовать в ArcMap.

Таблица 4.1 Вспомогательная таблица координат в Microsoft Excel

lakes	Y	X
Валдайское оз.	57.9910	33.2917
Ильмень оз.	58.2748	31.3159
Коробожа оз.	58.6522	34.4861

Таблица 4.2 Координаты исследуемых озёр и водохранилищ

№ п/п	Водоем	Широта	Долгота
		град	град
Бассейн Балтийского моря			
1	Валдайское оз.	57.9910	33.2917
2	оз. Ильмень	58.2748	31.3159
3	оз. Коробожа	58.6522	34.4861
4	оз. Охват	56.7706	32.4240
5	оз. Пелено	58.5629	33.9083
6	оз. Песьво	57.9057	34.9914
7	оз. Сяберо	58.8040	29.1452
8	оз. Удомля	57.9360	35.0438
9	оз. Черемецкое	58.6126	29.9441
10	оз. Чудско-Псковское	58.9983	27.7449
11	оз. Черное (с.Велье)	56.9680	28.5817
12	оз. Выртсьярв	58.2602	26.0069
13	оз. Пюхаярх	58.0304	26.4566
14	оз. Харку	59.4157	24.6168
15	оз. Каруярв	58.3792	22.2147
Бассейн Верхней Волги			
16	оз. Вялец	58.8006	33.9990
17	оз. Галичское	58.4080	42.1670
18	оз. Неро	57.1556	39.4290
19	оз. Плещево	56.7663	38.7790

20	оз. Селигер	57.2390	33.0340
21	оз. Сенеж (Сенежское)	56.2020	37.0080
22	оз. Чухломское	58.7800	42.6166
23	Верхневолжское вдхр.	56.8863	33.3172
24	Иваньковское вдхр	56.7353	37.1217
25	Истринское вдхр	55.9934	36.8228
26	Можайское вдхр	55.5335	35.9506
27	Озернинское вдхр	55.7469	36.1627
28	Рузское вдхр	55.7635	36.1080
29	Угличское вдхр	57.5257	38.2990
30	оз. Истошня	57.1300	32.3300
31	оз. Заборовское	57.0900	32.3990
32	оз. Хвошня	57.1200	32.2900
33	оз. Скорбеж	57.4400	37.1380
34	оз. Сомино	56.8500	38.6400
35	оз. Савельево	56.6400	38.6100
36	оз. Кубыча	57.7900	35.0500
37	оз. Рогозино	57.7700	35.0000
38	оз. Перхово	57.7100	35.1000
39	оз. Молдино	57.7500	35.2500
40	оз. Сестрино	57.7500	34.9300
41	оз. Кезадра	58.0500	35.2700
42	оз. Павловское	58.1500	35.4500
43	оз. Иловец	58.1920	35.1930
44	оз. Меглино	58.4800	35.2900

45	оз. Емонец	58.4500	34.8900
46	оз. Вожанское	59.2800	34.9200
47	оз. Березорадинское	59.1700	34.3500
48	оз. Лидское	59.7100	34.8700
49	оз. Ракитинское	58.9100	34.1600
50	оз. Видимирское	58.7700	34.3800
51	оз. Граничное	58.8100	34.2700

После добавления таблицы в ArcMap, выбираем *«отобразить данные XY»* здесь необходимо указать географическую систему координат, к которой привязана карта. В нашем случае это WGS_84 (World Geodetic System 1984). Это глобальная система координат для всего мира, и большинство карт, представленных в Интернете, имеют привязку именно к этой системе. В нашем случае скачанная карта STRM, имеет привязку GCS_WGS_1984, и добавляя любые элементы: точки, линии, полигоны – нужно указывать географическую систему карты, с которой мы работаем. После команды *«отобразить данные»* – точки носят только информационный характер, для работы с ними нужно их преобразовать в слой. Для этого выбираем *«Экспорт данных»*.

4.2 Работа с картой.

4.2.1 Наложение и привязка карт.

В ArcMap можно работать с различными изображениями карт, с файлом привязки или без него; конечно с картой, привязанной к географической системе, работа облегчается. Но карту можно привязать и «вручную».

В этом случае карта по умолчанию отобразится с координатами 0° широты и 0° долготы и тогда понадобится инструмент пространственной привязки. Выбираем «Каталог», вкладку «Свойства» карты, привязку которой необходимо выполнить. В строке пространственной привязки нажимаем «Изменить» (рисунок 4.1).

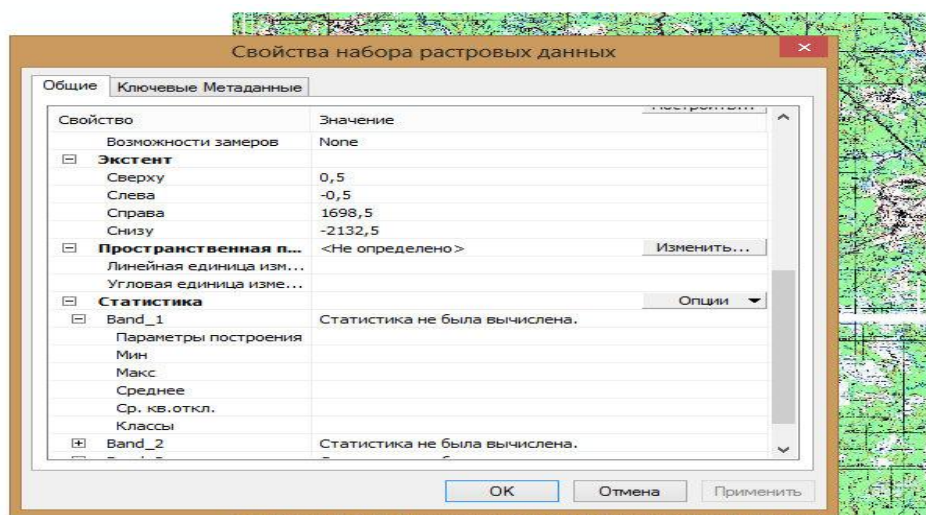


Рисунок 4.1 Изменение пространственной привязки

Привязка осуществляется по четырём точкам с заранее известными координатами. На картах Генштаба надписи координатной сетки нанесены в углах, а на картах, скачанных с помощью SAS.Planet (в случае если скачанный файл привязки не подошёл) координаты можно получить прямо в программе. В самых сложных случаях можно использовать места пересечения дорог и рек, координаты церквей и т.п. Главное – это наличие не менее четырёх точек в разных углах карты.

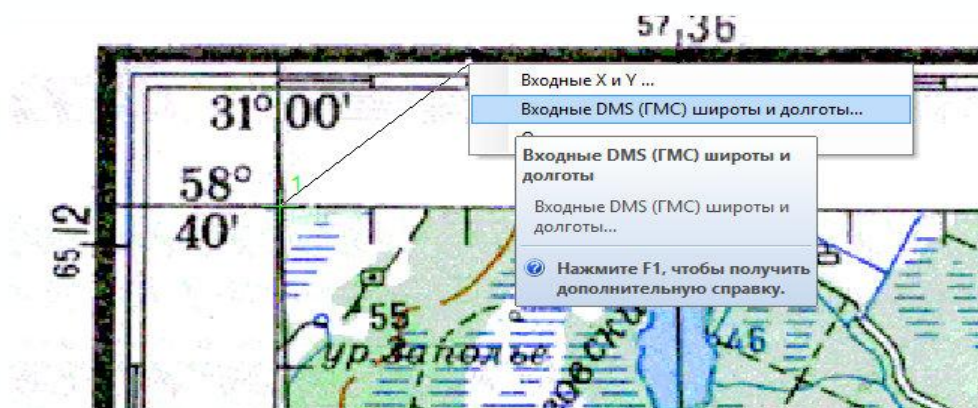


Рисунок 4.2 Привязка карты по координатам

На рис. 4.2 показан пример привязки карты по координатам. Опцию «Входные X и Y» используют, если вводятся десятичные градусы формата XX°,XXX . Для ввода координат формата $XX^{\circ} XX' XX''$ выбираем «Входные DMS(ГМС) широты и долготы», в нашем случае ГМС расшифровывается, как градусы минуты секунды, это сокращение производителя программы.

Для наглядности привязки, на рисунке. 4.3 показан пример наложения карт. Снизу карта ЦМР, сверху – топографическая карта Генштаба О-36-ХІІІ с 80% прозрачностью, где можно увидеть западную часть оз. Ильмень.

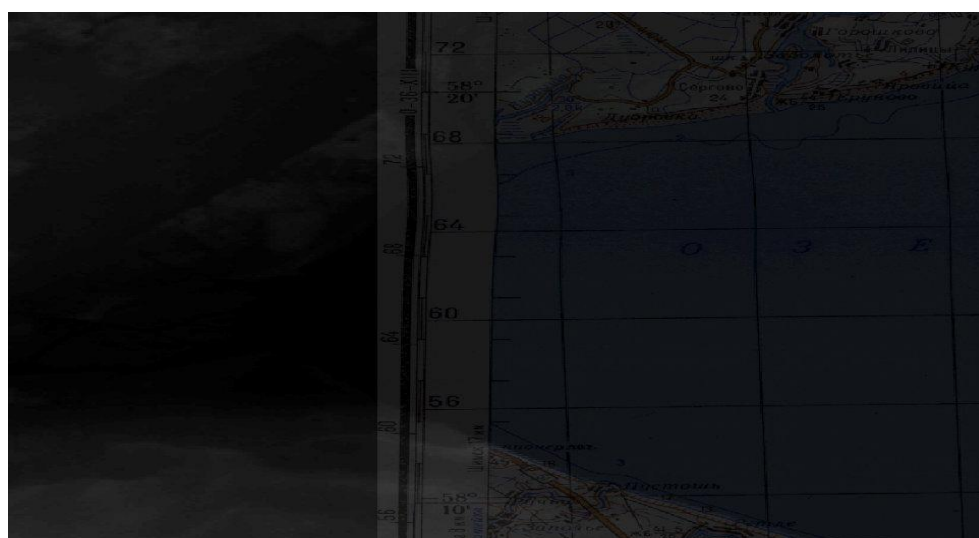


Рисунок 4.3 Пример совмещения карт.

Для сохранения результата в панели пространственной привязки, выбираем «*Трансформировать*». При выборе папки для сохранения важно не использовать папку, в которой находился исходный файл. Позже можно удалить слой с исходной картой, и добавить на ее место ту, которую получили.

4.2.2 Соединение карт из частей.

Водосборы иногда выходит за пределы одной карты, поэтому необходимо не только добавить недостающую часть, но ещё нужно объединить карты в одну. Для соединения двух и более частей используется инструмент «*Мозаика в новый растр*».

Местонахождение инструмента: *ArcToolbox/ Управление данными/ Растр/ Набор растровых данных/ Мозаика в новый растр*.

На рисунке 4.4 видна граница между изображениями, в таком виде карту использовать нельзя.

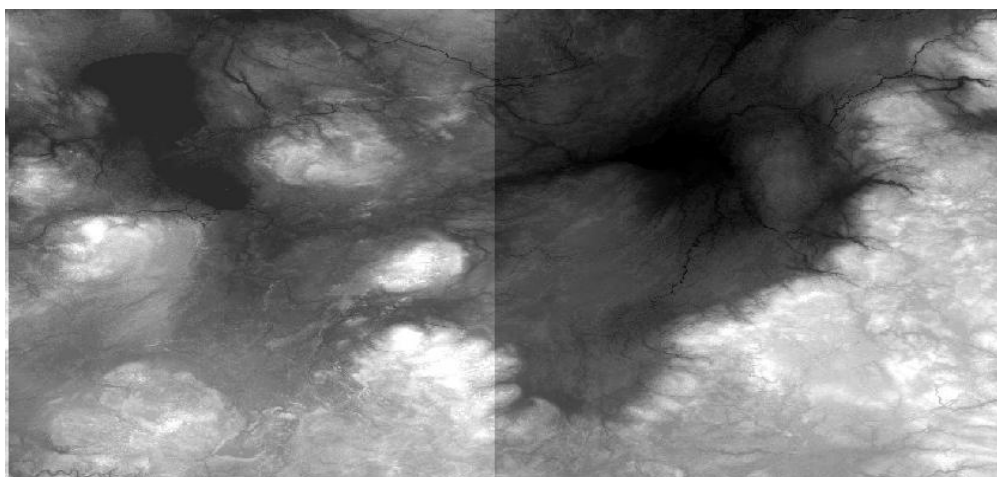


Рисунок 4.4 Вид до использования «Мозаики»

При использовании этого инструмента важно помнить, что в строке «*Имя набора растровых данных с расширением*» необходимо обязательно

указывать формат, т.е. имя должно иметь вид, например *//сев-запад.tif//*.
Выбираем число каналов – 1. Конечный результат на рисунке 4.5.

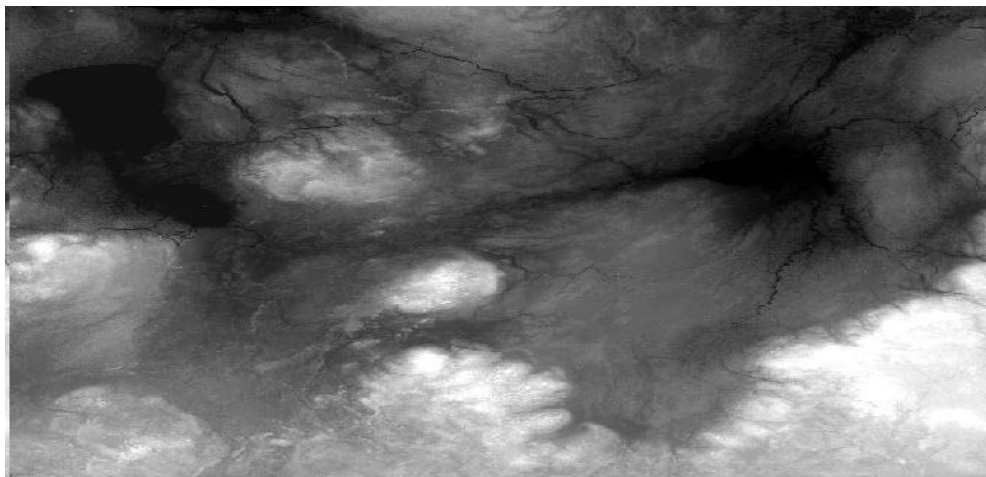


Рисунок 4.5 Вид после использования «Мозаики»

4.2.3 Вырезание.

Обработка карт большого размера занимает очень много времени, а также ресурсов ПК, обработка карт меньшего размера осуществляется в разы быстрее. Чтобы уменьшить карту, используем инструмент «Вырезание». Местонахождение инструмента: *ArcToolbox/ Управление данными/ Растр/ Обработка растра/ Вырезание*.

Вырезание осуществляется по полигону. Полигон отличается от растра наличием четкой границы, которую можно видоизменять, увеличивая или уменьшая число вершин. В нашем случае может быть использован полигон полученного водосбора, или он может быть нарисован вручную. Для создания полигона вручную создается шейп-файл.

Шейп-файлы представляют собой простой нетопологический формат для хранения геометрического местоположения и атрибутивной информации географических объектов. Шейп-файл – это один из форматов пространственных данных, с которыми в ArcGIS можно выполнять различные действия, в том числе редактировать.[27]

Шейп-файл может быть полигоном, точкой или линией. Создать шейп-файл можно в каталоге, щёлкнув на любой из папок правой кнопкой мыши, выбрать *Новый/ Шейп-файл* (но лучше, конечно, использовать отдельную папку, связанную с конкретной работой). В появившемся окне нужно выбрать то, что следует создавать (полигон, точку или линию), дать название, добавить географическую систему координат, к которой привязана карта. В нашем случае это GCS_WGS_1984. Для ускорения дальнейшей работы выбранную систему координат добавляем в избранное.

Работу с любым шейп-файлом начинать нужно с панели инструментов «Редактор», добавить её можно через настройки. Выбираем «Начать редактирование», добавляем наш шейп-файл. Если объект уже создан, после проделанных операций его можно редактировать (перемещать, добавлять и удалять вершины полигонов и т.д.). Если объект ещё не создан выбираем: *Редактор/ Окна редактирования/ Создать объекты/ шейп-файл*.

После проделанных операций нажимаем «Завершить редактирование».

Нарисовав полигон можно приступить к вырезанию нужной части карты. В инструменте «Вырезание» выбираем карту и полигон, по границе которого обрежется нужная карта.

4.3 Постройка водосбора водоёма.

К этому этапу у нас есть точки с координатами выбранных водоёмов. Загружаем их в Arc Map. Добавляем скачанные участки ЦМР. На покрытие всего участка исследования, понадобилось 4 «плитки» STRM: srtm_41_01, srtm_42_01, srtm_43_01 и srtm_44_01. Из них объединяем srtm_41_01, srtm_42_01 в первую карту. srtm_42_01 и srtm_43_01 во вторую. И srtm_43_01 и srtm_44_01 в третью, используя инструмент «Мозаики», описанный выше. Это делается для ускорения обработки, т.к. работа с большими картами требует много времени и ресурсов ПК, а соединив таким образом карты, мы

объединяем водосборы, разделённые границами карт. Далее работаем с группой инструментов SpatialAnalyst/Hydrology (Гидрология).

4.3.1 Заполнение.

Заполняет локальные понижения в растре поверхности для удаления всех небольших ошибок и неточностей, присущих данным.

Использование:

Локальное понижение – это ячейка с неопределённым направлением стока; вокруг нее не существует ячеек с меньшей, чем у этой ячейки, высотой. Точка устья – это пограничная ячейка с наименьшей высотой для водосборной области локального понижения. Если бы локальные понижения были заполнены водой, в этих точках вода «утекала бы» с поверхности.

Ограничение по Z задаёт максимальную допустимую разницу между глубиной точки локального понижения и устья и определяет, какое понижение будет заполнено, а какое останется незатронутым. Ограничение по Z не является значением максимальной глубины, до которой будет заполнено локальное понижение.

Например, рассмотрим область локального понижения, где точка устья находится в 210 футах по высоте, а самая глубокая точка локального понижения – 204 фута (то есть разница составляет 6 футов). Если ограничение по Z равно 8, это конкретное локальное понижение будет заполнено. Однако, если ограничение по Z равно 4, это локальное понижение не будет заполнено, поскольку глубина понижения превышает разницу и оно будет считаться допустимым понижением.

Все локальные понижения, которые по глубине меньше, чем ограничение по Z, и ниже, чем самая низкая из прилегающих соседних ячеек, будут заполнены до высоты своих точек устьев.]

Запуск инструмента *Заполнение* (Fill) может быть требователен к процессору, оперативной памяти и занимаемому месту на диске. Он может

требовать до четырех раз большего объема дискового пространства, чем входной растр.

Число локальных понижений, определяемых с использованием ограничения по Z, будет задавать время, требуемое на обработку. Чем больше локальных понижений имеется, тем больше потребуется времени на обработку.

Инструмент *Локальное понижение* (Sink) может быть использован перед тем, как запустить инструмент *Заполнение* (Fill), чтобы найти число локальных понижений и помочь определить их глубину. Знание глубины локальных понижений может помочь в определении подходящего значения ограничения по Z.

Инструмент *Заполнение* локальных понижений может быть также использован для удаления пиков. Пик – это ячейка, вокруг которой нет ячеек выше нее. Для удаления пиков входной растр поверхности должен быть инвертирован. Эту операцию можно выполнить с помощью инструмента *Минус* (Minus). Задайте наибольшее значение растра поверхности в качестве первых входных данных инструмента *Минус* (Minus) и растр поверхности в качестве вторых входных данных. Выполните заполнение. Инвертируйте результаты с тем, чтобы получить поверхность, имеющую исходные значения растра поверхности с удаленными пиками. Ограничение по Z может быть применено и к этому процессу. Если для ограничения по z не задано никакого значения, будут удалены все пики. Если значение определено, в тех случаях, когда разница в значении Z между пиком и самой высокой соседней ячейкой больше, чем ограничение по Z, этот пик удален не будет.

Локальные понижения (и пики) зачастую представляют собой небольшие ошибки, возникающие из-за разрешения данных или округления высот до ближайшего целого значения.

Локальные понижения должны быть заполнены для обеспечения более корректного выделения бассейнов и водотоков. Если локальные понижения не заполнены, выделенная дренажная сеть может иметь разрывы.

Инструмент *Заполнение* (Fill) использует эквиваленты нескольких инструментов, таких как *Фокальный сток* (Focal Flow), *Направление стока* (Flow Direction), *Локальное понижение* (Sink), *Водосборная область* (Watershed) и *Заполнение зон* (Zonal Fill) для обнаружения и заполнения локальных понижений. Применение инструмента – это итеративный процесс, который повторяется до тех пор, пока не заполнены все локальные понижения с учетом заданного ограничения по Z (по высоте). По мере того, как локальные понижения заполняются, на границе заполняемых зон могут создаваться новые локальные понижения, которые будут удалены во время следующей итерации.

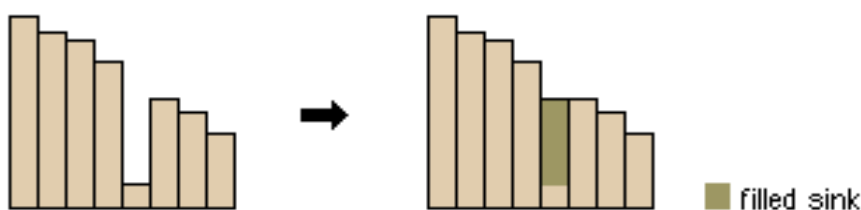


Рис. 4.6 Профиль локального понижения до и после запуска инструмента *Заполнение*

Инструмент может также использоваться для удаления локальных повышений, которые являются ложными ячейками с высотой, большей, чем можно было бы ожидать, учитывая тренд окружающей поверхности.

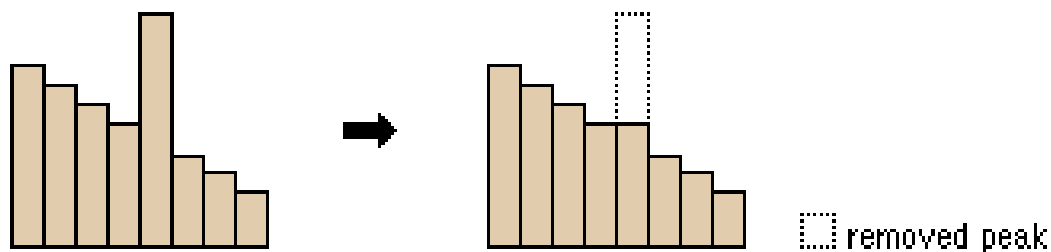


Рис. 4.7 Профиль пика до и после запуска инструмента *Заполнение*. [28]

4.3.2 Направление стока

Данный инструмент используется для получения гидрологических характеристик поверхности и определения направления стока из каждой ячейки раstra. Инструмент использует растр с заполненными локальными (filled sinks) понижениями в качестве входных данных и выдает растр, показывающий направление стока каждой ячейки. Если выбрана опция «Выходной растр понижения» (Output drop raster), создается выходной растр, показывающий отношение максимального изменения по высоте из каждой ячейки вдоль направления стока к расстоянию между центрами ячеек, выраженное в процентах. Если выбрана опция «Сток из крайних ячеек направлен наружу» (Force all edge cells to flow outward), сток из всех ячеек на ребре раstra поверхности будет осуществляться наружу, за края раstra.

Есть восемь корректных выходных направлений относительно восьми смежных ячеек, в которые может перейти сток. Этот подход обычно называется моделью восьминаправленного стока (D8).

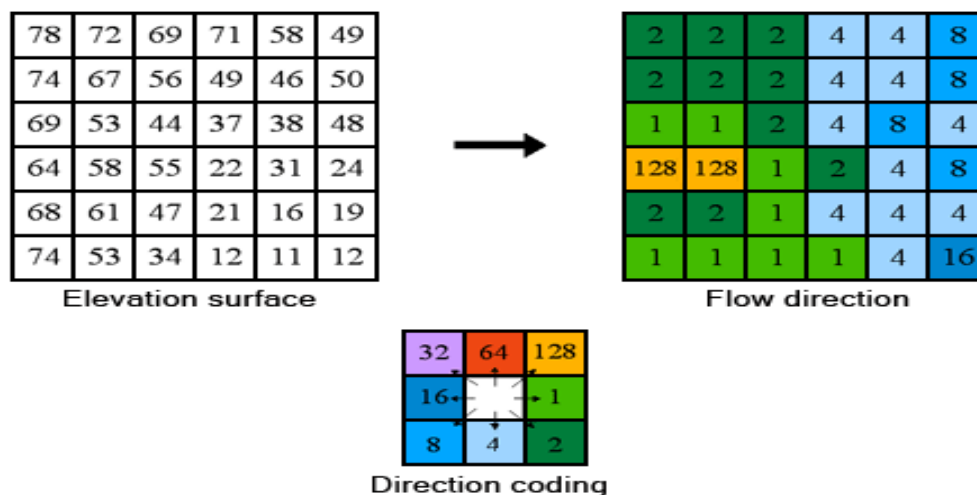


Рисунок 4.8 Направление потока из рассматриваемой точки и значение, присваиваемое направлению

Расстояние вычисляется между центрами ячеек. Следовательно, если размер ячейки принять за единицу, расстояние между двумя ортогональными ячейками будет равно 1, а расстояние между диагональными ячейками – 1.414

(квадратный корень из 2). Если максимальное понижение высоты до ближайших ячеек одинаково в нескольких направлениях, область соседства расширяется до тех пор, пока не будет найден самый крутой спуск.

Если найдено направление самого крутого понижения, выходной ячейке дается значение, представляющее это направление.

Если все соседние ячейки выше, чем обрабатываемая ячейка, такая ячейка будет рассматриваться как ошибка в данных; она должна быть заполнена до минимального значения высоты соседних ячеек. Сток будет осуществляться в эту ячейку. Однако в том случае, если локальное понижение размером в одну ячейку расположено на физическом краю растра, или в ее окрестностях есть хотя бы одна ячейка со значением NoData (нет данных), заполнения не происходит из-за недостаточной информации по соседним ячейкам. Чтобы ячейка могла рассматриваться как истинное локальное понижение размером в одну ячейку, для нее должна быть информация по всем соседним ячейкам. Если сток из двух ячеек осуществляется друг в друга, они являются локальными понижениями с неопределенным направлением стока. Такой метод определения направления стока по цифровой модели рельефа рассмотрен в книге Дженсона и Доминика (Jenson and Domingue, 1988).[29]

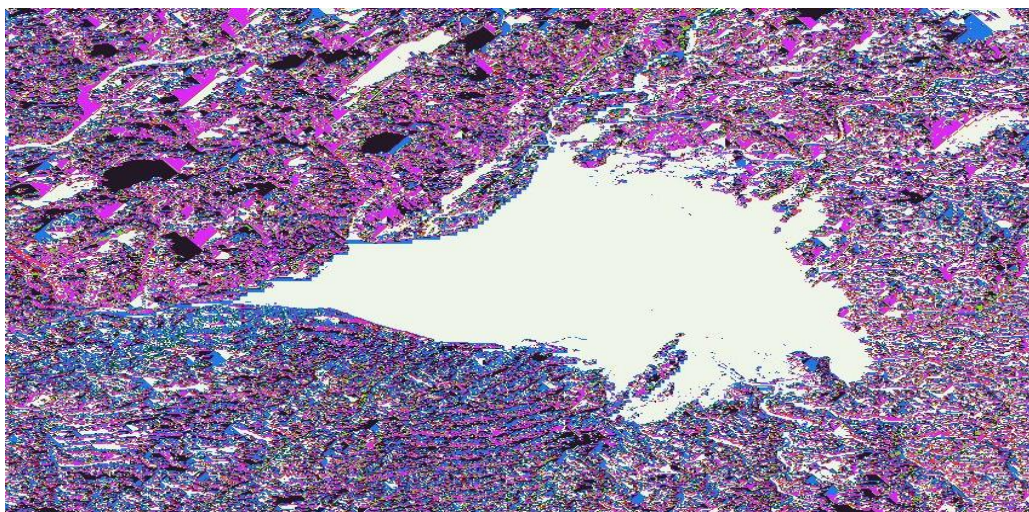


Рисунок 4.9 Пример растра направления потока

(каждая ячейка растра содержит код направления потока)

4.3.3 Суммарный сток

Инструмент *Суммарный сток* (Flow Accumulation) вычисляет суммарный сток как суммарный вес всех ячеек, впадающих в каждую ячейку вниз по склону выходного растра. Если не предоставлено растра весов, каждой ячейке назначается вес 1, а значением ячеек выходного растра является количество ячеек, впадающих в каждую ячейку.

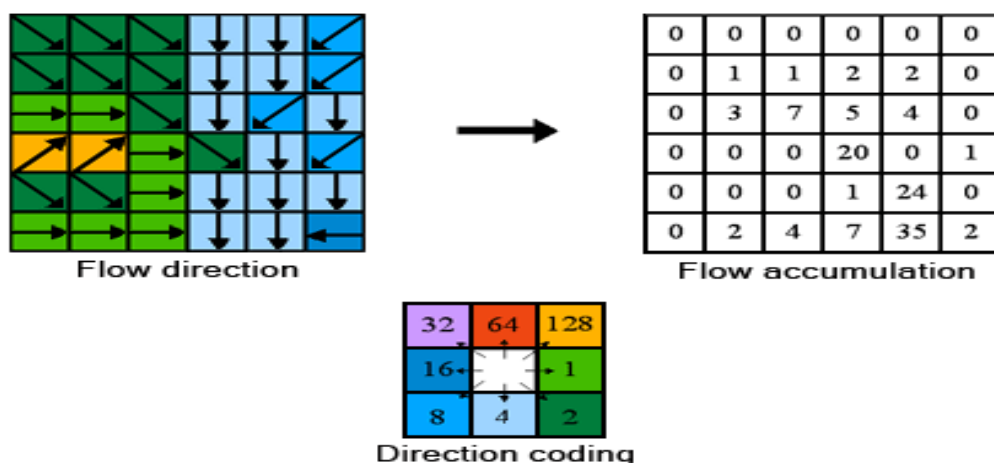


Рисунок 4.10 Определение суммарного стока

Рисунок наверху слева показывает направление перемещения из каждой ячейки, а правый верхний рисунок – количество ячеек, впадающих в каждую ячейку.

Ячейки с высоким суммарным стоком – это участки концентрированного стока; они могут быть использованы для определения русел водотоков. Ячейки с суммарным стоком, равным нулю, - это локальные топографические пики; они могут быть использованы для выделения хребтов или линий водораздела.[30]

На рисунке 4.11 представлен вид обрисованной гидрографической сети. Программа направляет водотоки в понижения рельефа. Здесь же видно, что озеро представляет собой, абсолютно ровную поверхность, по которой согласно алгоритму программы все впадающие водотоки, направлены по наикратчайшему пути в ячейки с максимальным суммарным стоком.

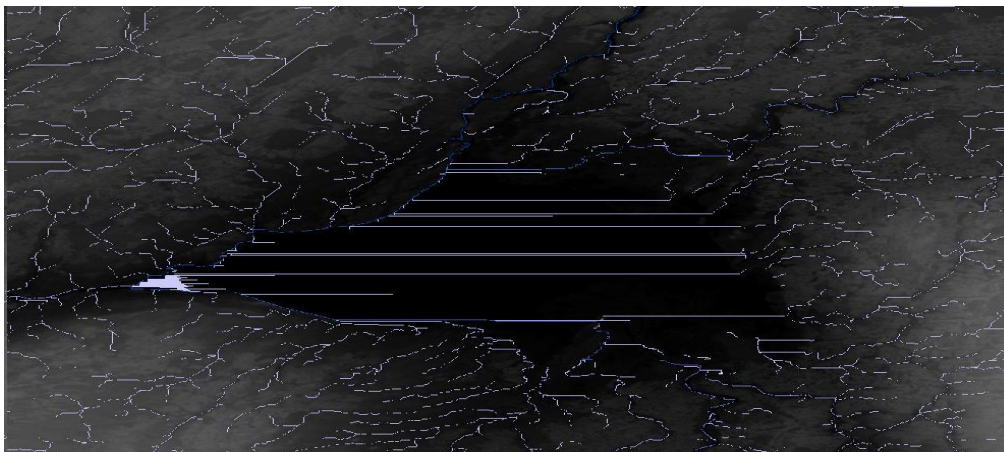


Рисунок 4.11 Вид карты после определения суммарного стока

Дальше в нашем распоряжении есть уже загруженная топографическая карта, которую можно наложить и рассмотреть результат.



Рисунок 4.12 Нанесение на топографическую карту полученной сети водотоков

На рисунке 4.12 отчетливо видно, какое влияние на результат могут внести заболоченные территории, ввиду незначительных изменений высот рельефа, которые сглаживаются при выполнении операции по «заполнению».



Рисунок 4.13 Влияние масштаба изображения на результат

На рисунке 4.13 карта уменьшена практически в 20 раз, проделаны все те же операции. Результат кардинально отличается от полученного ранее.

4.3.4 Привязка точки устья

Изначально мы не знаем, что из себя представляет водосбор водоёма, следовательно, невозможно вырезать карту меньшего масштаба, вмещающую водосбор конкретного озера. Поэтому работать начинаем с картами большего масштаба.

На подготовленных картах отображаем точки озёр, выбранных для исследования описанные в пункте 4.1 (таблица 4.2). Используя атрибутивную таблицу слоя, можно выбрать озеро и нажать «*приблизить*». Координаты озёр взяты приблизительными, чтобы найти ориентировочное место расположения озера. На изображении видно, куда идет сток с озера, но в виду масштабности изображения, описанной выше, точки соединения притоков на малых озерах могут быть в стороне. Следующим этапом мы создаем точку в виде шейп-файла (создание шейп-файла описано в п.4.2.3). Точка создается для каждого озера своя, поэтому не сложно назвать её названием озера. Работая так же как с полигоном, через «*Редактор*» выбираем нашу точку, и «*создать объект*».

Точку располагаем прямо на водотоке, это облегчает привязку, т.к. для привязки необходимо очень точное расстояние.

Выбираем инструмент «*Привязка точки устья*» расположенной по адресу: *ArcToolbox/ Spatial Analyst/ Гидрология/ Привязка точки устья*.

Здесь мы выбираем точку с названием нашего озера, и результирующий файл суммарного стока, расстояние привязки ставим 0,001. После успешной привязки переходим к следующему этапу определение водосборной области. Привязка точки устья необходима, т.к. в этом месте находится ячейка со значением суммарного стока водосбора, который мы хотим определить.

4.3.5 Водосборная область.

Здесь же во вкладке «Гидрология» выбираем инструмент «*Водосборная область*». Нам понадобятся результаты, полученные от «*Направление стока*» и «*Привязка точки устья*».

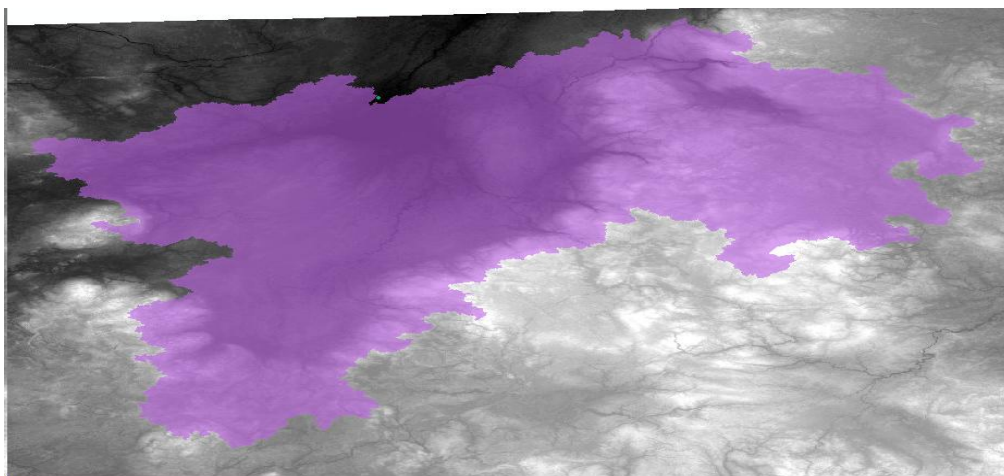


Рисунок 4.14 Водосбор оз. Ильмень

4.4 Определение площади водосбора.

4.4.1 Преобразование растра в полигон

Построенный в п.4.3.5 водосбор – это растровое изображение, а для определения площади нужна полигонная область, поэтому используем инструмент «*Растр в полигон*»:

ArcToolbox/ Конвертация/ Экспорт из растра/ Растр в полигон.

Преобразованное изображение обретает границу. Но, работая на больших территориях, нельзя не учитывать существование поправки по координатам для каждой географической зоны. Мы работаем в системе WGS_84, являющейся единой системой для всей планеты, которая отличается от локальных систем. Эта система разделена на UTM зоны, которые содержат поправку.

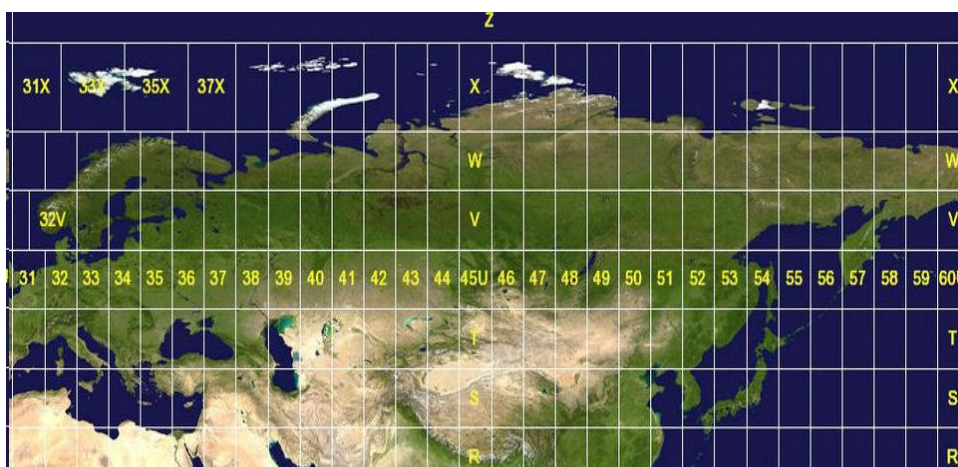


Рисунок 4.15 UTM зоны

Преобразование географической системы осуществляется инструментом «*Проецировать*»: *ArcToolbox/ Управление данными/ Проекция и преобразования/ Объекты / Проецировать.*

Применяя этот инструмент, мы меняем используемую географическую систему на систему, соответствующую нашей зоне. Озеро Ильмень находится в 36-й зоне, а оз. Чудское – в 35-й. Выбираем WGS_1984_UTM_Zone_36N.

4.4.2 Вычисление площади.

Самый простой способ вычисления площади – использование инструмента «*Вычислить площади*» (Calculate Areas). Для определения площади водосбора используем полигон, полученный последним инструментом «*Проецировать*»:

ArcToolbox/ Пространственная статистика/ Утилиты/ Вычислить площади.

Площадь водосбора оз. Ильмень получилась 68 603810151,521599 м²

Для перевода в км² умножаем на 10⁻⁶, и получаем 68 604км². Согласно данным ОГХ общая площадь водосбора составляет 67 190км².

Относительная погрешность высчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{F_{\text{факт}} - F_{\text{расч}}}{F_{\text{факт}}} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

где $F_{\text{факт}}$ – фактическая площадь водосбора;

$F_{\text{расч}}$ – площадь, полученная с помощью ArcMap.

Для оз. Ильмень погрешность составила 2,1%.

4.5 Анализ полученных результатов.

Для 51 исследуемого водоёма, в соответствии с вышеописанными алгоритмами, были определены площади водосборных бассейнов. Были вычислены погрешности полученных значений относительно фактических, представленных в Государственном водном кадастре (ГВК) [31;32]. Полученные результаты представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Относительные погрешности определения площадей водосборов водоёмов

№ п/п	Название водоема	Площадь зеркала водоёма км ²	Общая площадь водосбора км ²	Расчетная площадь водосбора км ²	Относительная погрешность, %
Бассейн Балтийского моря					
1	Валдайское оз.	19.7	97.2	171.7	76.6
2	оз. Ильмень	2090	67190	68604	2.1
3	оз. Коробожа	6.4	1026.4	903.7	12.0
4	оз. Охват	13.6	585.6	1014.7	73.3
5	оз. Пелено	3.8	28.3	21.9	22.5
6	оз. Песьво	6.6	127.6	156.6	22.7
7	оз. Сяберо	14.2	47.9	35.9	25.1
8	оз. Удомля	10.1	400.1	477.2	19.3
9	оз. Черемецкое	15	511	483.5	5.4
10	оз. Чудско-Псковское	3530	47730	50055	4.9
11	оз. Черное (с. Велье)	0.14	13.94	7.6	45.2

12	оз. Выртсыярв	270	3380	3444	1.9
13	оз. Пюхаярх	2.9	46.5	45.1	2.8
14	оз. Харку	1.6	50.6	52.4	3.4
15	оз. Каруярв	3.3	15.8	14.9	5.8
Бассейн Верней Волги					
16	оз. Вялец	19	1.46	10.6	44.4
17	оз. Галичское	872	75.4	852.6	2.2
18	оз. Неро	1220	54.4	991.1	18.8
19	оз. Плещево	425	50.8	390.9	8.0
20	оз. Селигер	2310	212	2426	5.0
21	оз. Сенеж (Сенежское)	69.2	8.9	86.1	24.4
22	оз. Чухломское	317.7	48.7	354.0	11.4
23	Верхневолжское вдхр.	3499	179	3545	1.3
24	Иваньковское вдхр.	41000	327	40733	0.7
25	Истринское вдхр.	991	27.4	1013.3	2.3
26	Можайское вдхр.	1360	31	1382.1	1.6
27	Озернинское вдхр.	738	23	765	3.7
28	Рузское вдхр.	1143	33	1128	1.3
29	Угличское вдхр.	60 000	249	60 210	0.4
30	оз. Истошня	127	1.52	145.6	14.6
31	оз. Заборовское	20.1	0.52	18.1	10

32	оз. Хвошня	106	2.16	119.7	12.9
33	оз. Скорбеж	71.8	2.7	82.5	14.9
34	оз. Сомино	488	1.8	455.2	6.7
35	оз. Савельево	25.2	0.44	17.5	30.6
36	оз. Кубыча	61.2	4.6	69.3	13.2
37	оз. Рогозино	434	1.56	396	8.8
38	оз. Перхово	633	3	610.1	3.6
39	оз. Молдино	92.2	5.16	83.3	9.7
40	оз. Сестрино	282	0.58	352.4	25.0
41	оз. Кезадра	120	8.7	103.7	13.6
42	оз. Павловское	421	0.8	423.6	0.6
43	оз. Иловец	78	5.24	92.5	18.6
44	оз. Меглино	192	24.2	209.8	9.3
45	оз. Еменец	109	0.7	116.9	7.2
46	оз. Вожанское	709	2.5	540	23.8
47	оз. Березорадинское	220	5.8	196	10.9
48	оз. Лидское	446	4.1	62.8	85.9
49	оз. Ракитинское	545	2.7	289.6	46.9
50	оз. Видимирское	118	4.8	81.8	30.7
51	оз. Граничное	443	2.2	427	3.6

Зависимость погрешности от площади водосбора водоёмов представлена на рисунке 4.16.

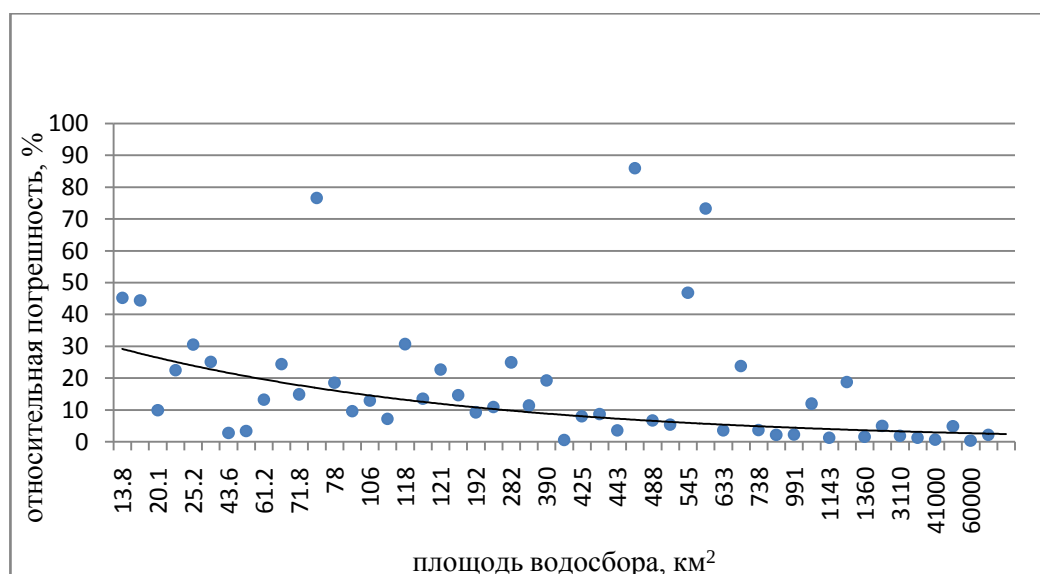


Рисунок 4.16 График зависимости погрешности определения площади водосбора от размера водосбора

Погрешность определения площади водосбора изменяется от 0,4 до 85,9%. В итоге, 34 водосбора имеют погрешность меньше 15%, у 17 – менее 5%. С минимальной погрешностью определились площади небольших водосборов озёр Эстонии (менее 50км²), так же –водохранилищ в бассейне Верхней Волги.

Для уточнения и анализа результатов, а также для выявления причин, возможных ошибок, с водосборами, показавшими наибольшие погрешности, были выполнены дополнительные операции:

1. Используя топографические карты Генштаба масштаб 1:100 000, было проверено, соответствует ли действительности водосбор выбранного объекта. Для этого изображение полученного в ArcMap водосбора совмещалось с топографической картой.

2. Для оценки рельефа водосбора и выявления несоответствий между топографической картой и исходной основой в виде ЦМР STRM строились изолинии.

Озеро Валдайское.

Проведя анализ, используя наложение топографических карт и построение изолиний, было выявлено, что построенный в ArcMap водосбор озера ошибочный.

Анализ с помощью топографических карт позволил определить, что сток из озера направлен в другую сторону, и из-за этого водосбор соседнего озера Ужин входит в водосбор озера Валдайское.

Анализ с помощью построения изолиний выявил, что рельеф искажен, т.к. разрешение, используемой, ЦМР не позволяет в полной мере описать резкие перепады высот. В данном случае в некоторых местах высокие склоны речной долины, расположенные близко друг к другу, были соединены, образуя «преграду» перед вытекающей из озера реки Валдайка. Определенное как локальное понижение озеро было «заполнено» до высоты 204м. над ур.м. при высоте уреза 192 м.

Озеро Лидское.

Ошибка определения водосборной области вызвана тем, что не был учтен приток. Анализ рельефа с помощью наложения изолиний показал, что водоток «перекрыт» там, где русло реки Лидь очень сильно сужается. На спутниковых снимках видно происходящую здесь русловую деятельность – незавершенное меандрирование, замедленное образованными здесь озерами (рис.4.17).

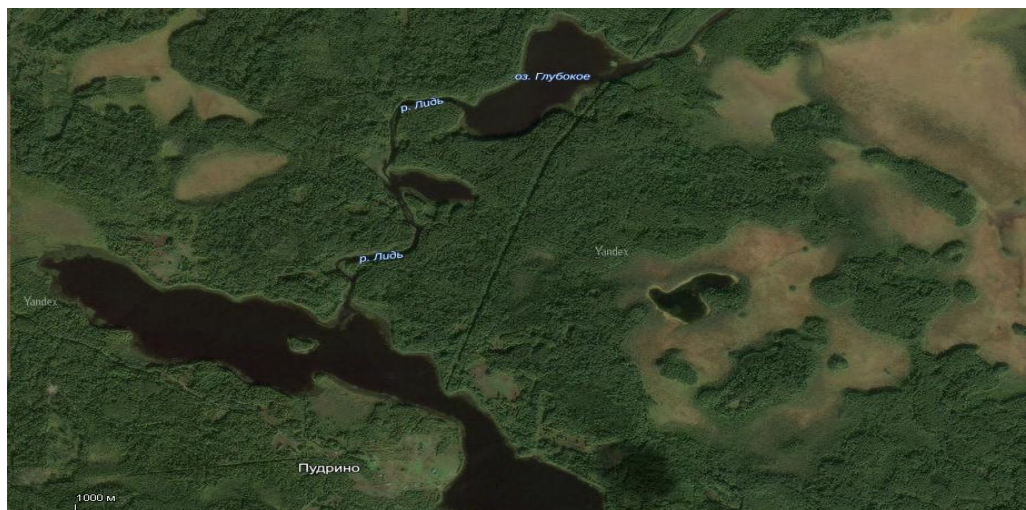


Рисунок 4.17 – Озеро Лидское

Озеро Охват.

Расчетная площадь водосбора озера в два раза превысила соответствующее значение из ОГХ. Место вытекания р. Западная Двина является самой низкой точкой водосбора – 214м над ур. м., самая высокая – 312 м у дер. Заболотье.

Анализ с помощью топографических карт показал, что реки, имеющиеся на водосборе, действительно направлены в сторону оз. Охват. Анализ с использованием изолиний подтвердил уклон в сторону озера.

Согласно карте ГосГисЦентра (ГГЦ) точка устья определена правильно, т.к. узкие перешейки могли делить озеро на разные водоемы (рис. 4.18).



Рисунок – 4.18 Озеро Охват

Озеро Ракитинское.

Анализ с использованием топографических карт показал, что ошибка объясняется тем, что не были учтены два притока – реки Рыбина и Медведа. Реки берут свое начало из болот севернее озера. На границе, где начинается заболоченная территория, сток уходит в сторону других болот, находящихся дальше, исследуемого озера. Водораздел по заболоченной территории, имеет очень малые высоты.

Озеро Черное (с. Велье)

Анализ с помощью топографических карт показал, что при определении площади была допущена ошибка и неправильно указано местоположение устья. После исправления ошибки и пересчёта площадь водосбора оказалась равна 2.48 км² (при ошибочной величине 7.64 км²). По данным ОГХ площадь водосбора составляет 13.94 км².

Кроме того, водосбор не захватил сеть из искусственно созданных каналов мелиорации, сток из которых был направлен в р. Исса. Анализ рельефа с помощью изолиний выявил ошибки высотных значений ЦМР, т.к. высоты не совпадали со значениями на топографической карте.

Озера Вялец, Видимирское, Ракитинское, Коробожа расположены в одном районе. Анализ с помощью спутниковых снимков, топографических карт Генштаба и ГГЦ, что для них характерно болотное питание. Площадь, определенная с помощью ArcMap всегда занижена за счет того, что не учтены все притоки. Анализ с использованием изолиний показал Перепады высот на водосборах незначительные, из-за этого имеют место ошибки, такие как отделение притоков и направление их в соседние водосборы.

Озеро Савельево

Согласно анализу, озеро бессточное, на водосборе озера водотоки, не направленные, часто прерываются. Дальнейший анализ был проведен по проверке границ водосбора, водораздел, проведенный с помощью ArcMap нужно корректировать, есть не учтенные площади. Проведя анализ с помощью изолиний, выявлено несовпадение по высотным отметкам, существующие возвышения не учтены, соответственно не учтен сток с этих областей

Озеро Вожанское.

Интересно озеро тем, что часть его стока с бассейна озера отводится на Балтийский склон Тихвинского водного пути (185 км²) [31]. Анализ с помощью топографических карт показал, что, действительно, граница водораздела проложена между Тихвинским каналом и р. Валченка. Именно в этом месте изменяется направление течения водотоков. В работе для анализа использовался естественный водосбор 709 км². Если учесть этот факт, то относительная погрешность заметно уменьшается (до 3% с 24.8%).

Проведя детальный анализ водосборов, полученных с помощью ArcMap, применив инструменты ArcGIS и топографические карты можно выделить основные факторы, способные понизить точность определения площадей водосборов водоёмов:

- Размер водного объекта (чем больше объект, тем меньше ошибка)
- V-образная форма поперечного профиля речной долины малых и средних рек: В таких местах высотная ошибка модели рельефа может составлять до 10 м.
- Заболоченность территории: ошибка не превышает 3м, но оказывает влияние на правильность нанесения водораздела. Суммарный сток в этом случае получается смещенным в сторону

- Искусственно созданные каналы мелиорации, которые не учитываются моделью, на территориях не имеющих выраженного уклона.

Проанализировав результаты определения площадей водосборов и причины значительных погрешностей, можно сделать вывод, что существует прямая связь между ошибками модели рельефа и разрешением карты ЦМР, которые и повлияли на результат. Горизонтальный размер характерных изменений рельефа не превышает 90м, что соответствует разрешению одного пикселя ЦМР STRM.

Анализ производился с помощью совмещения карт Генштаба масштаб 1:100000, карт ГосГисЦентра масштаб 1:25000 с изолиниями, проведенными по имеющейся ЦМР.

Оценка связи полученных и фактических значений площадей водосборов

Анализ проведем с помощью уравнения линейной регрессии. Уравнение можно рекомендовать для практических расчетов, если выполнены следующие условия:

$$n \geq 10; \quad |r| \geq 0.7; \quad |r|/\sigma_r \geq 2; \quad |a|/\sigma_a \geq 2,$$

где n — число наблюдений

r — коэффициент парной корреляции

σ_r — стандартная ошибка коэффициента парной корреляции

a — коэффициент регрессии

σ_a — стандартная ошибка коэффициента регрессии

Уравнение линейной регрессии имеет вид

$$y = ax + b \quad , (4.2)$$

где x и y — переменные величины

b — свободный член

Коэффициент регрессии определяется по формуле:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.3)$$

Свободный член уравнения регрессии определяется по формуле:

$$b = \bar{y} - a \bar{x}. \quad (4.4)$$

Коэффициент парной корреляции r определяется по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4.5)$$

где $\bar{x}$ и $\bar{y}$ – среднее значение выборок.

$$\sigma_r = (1 - r^2) / \sqrt{n - 1}. \quad (4.6)$$

$$\sigma_a = \sigma_{y(x)} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.7)$$

где $\sigma_{y(x)}$ – стандартная ошибка уравнения линейной регрессии

$$\sigma_{y(x)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y})^2 / n - 2}, \quad (4.8)$$

где $\tilde{y}$ – величина, рассчитанная по уравнению регрессии (в зависимости от x_i).

Для более детального рассмотрения все исследуемые водоёмы разделены на две группы:

- озера с очень малыми водосборам, менее 150 км²;
- водоёмы с малыми и частично средними водосборами, от 150 до 1500 км².

Водоёмы с площадями водосборов более 2 000 км² не использовались, потому что их выборка слишком мала.

1. Озера с площадью водосбора менее 150 км² рисунок 4.19.

Из этой группы исключено оз. Валдайское, причина возникновения неточности определения описана выше.

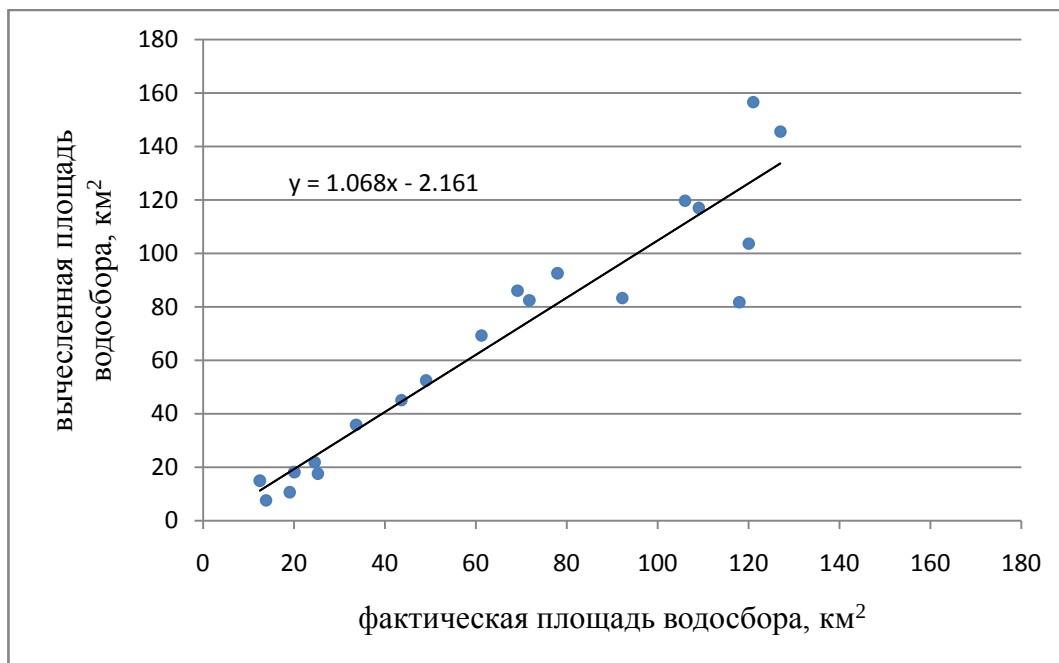


Рисунок 4.19 – Зависимость между фактическими и вычисленными площадями водосборов (< 150 км²)

Полученные параметры линейной регрессии,

$$n = 20; |r| = 0,95; |r|/\sigma_r = 40,4; |a|/\sigma_a = 12,6,$$

свидетельствуют о том, что вычисленные величины имеют надежную связь с данными ГВК.

2. Водоёмы с площадью водосбора от 150 до 1500 км² рисунок 4.20.

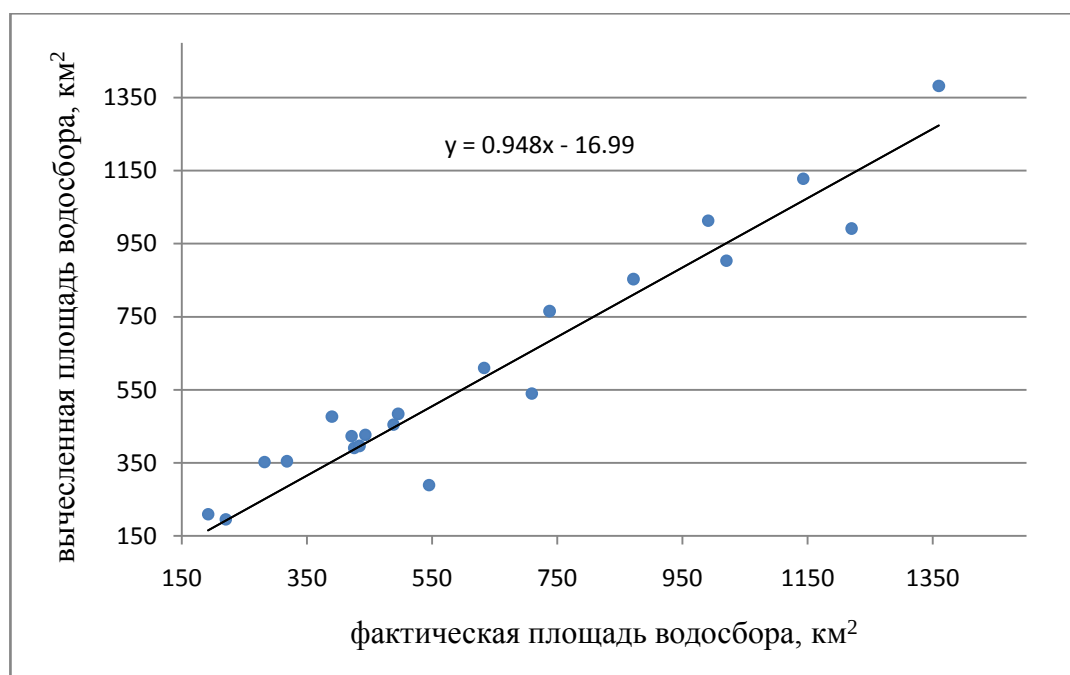


Рисунок 4.20 – Зависимость между фактическими и вычисленными площадями водосборов (150-500 км²)

Полученные параметры линейной регрессии,

$$n=22; |r|=0,94; |r|/\sigma_r=38,7; |a|/\sigma_a=12,6,$$

свидетельствуют о том, что вычисленные величины имеют надежную связь с данными полученными из справочника.

Полученные водосборы представлены на рисунках 4.21 и 4.22

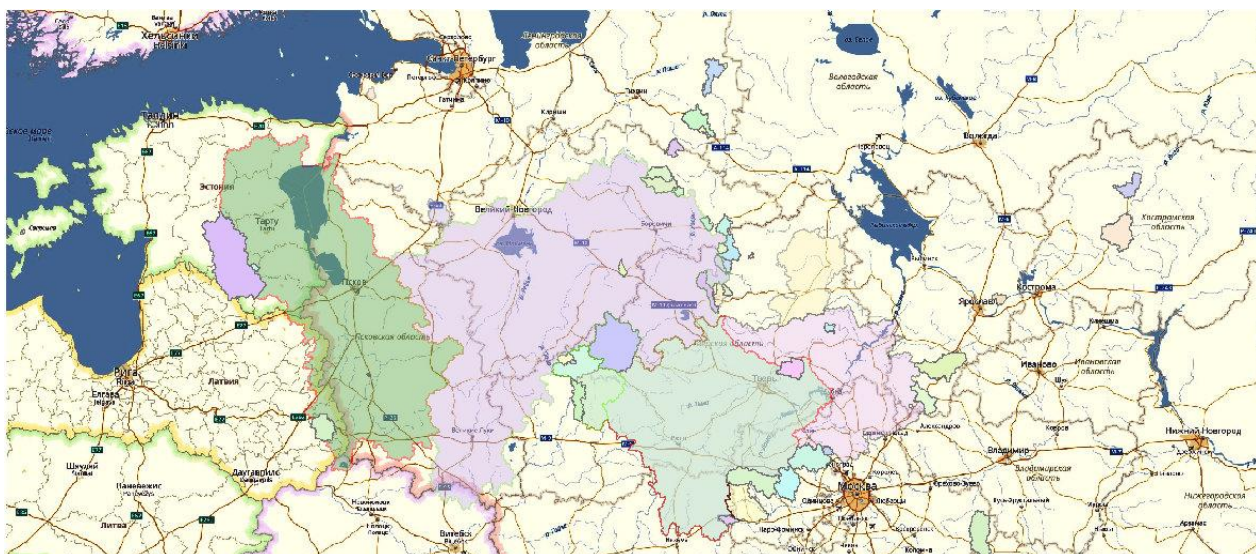


Рисунок 4.21 – Территория исследования



Рисунок 4.22 – Водосбор оз. Чудско-Псковского, включая оз. Выртъярв

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате осуществления поставленных задач цель проекта была достигнута: оценены возможности применения ArcGIS/ArcMap 10.1 и цифровой модели рельефа (ЦМР) STRM. Получены характеристики водосборов 51 водоёма. Был разработан и успешно применён алгоритм оценки площади водосбора водоёма с использованием ArcGis и ЦМР (SRTM). В результате построены линии водоразделов и схемы водосборов водоёмов, многие из которых ранее не были опубликованы. Получены значения площадей водосборов и выполнено их сравнение данными, ранее опубликованными в ОГХ и других источниках. Проанализированы факторы, влияющие на точность определения площадей водосборов. Приведены методы анализа и уточнения полученных результатов.

Средняя погрешность определения площадей водосборов водоёмов составляет 16.7%; для водоёмов с площадью водосбора более 1 500 км² – 2.3%; для водоёмов с площадью водосбора от 150 до 1 500 км² – 16.7%; для водоёмов с площадью водосбора до 150 км² – 21.4%.

Из 23 водоёмов с площадью водосбора от 150 до 1 500 км² 16 имеют погрешность менее 15%, а 8 – менее 5%. Водоёмы с площадью водосбора до 150 км² из 21 одиннадцать имеют погрешность менее 15%

Использование только инструментов ArcGIS не всегда позволяет получить точные данные. Получение более точных результатов возможно при совместном использовании ЦМР, современных топографических карт, снимков из космоса, корректировке и детальном анализе данных.

Результаты выполненного исследования можно рассматривать в качестве основы для:

1. Получения отсутствующих данных о водосборах водоёмов.
2. Создания региональных ГИС гидрологического назначения.

3. Применения инструментов 3-D анализа для создания объёмной модели поверхности.

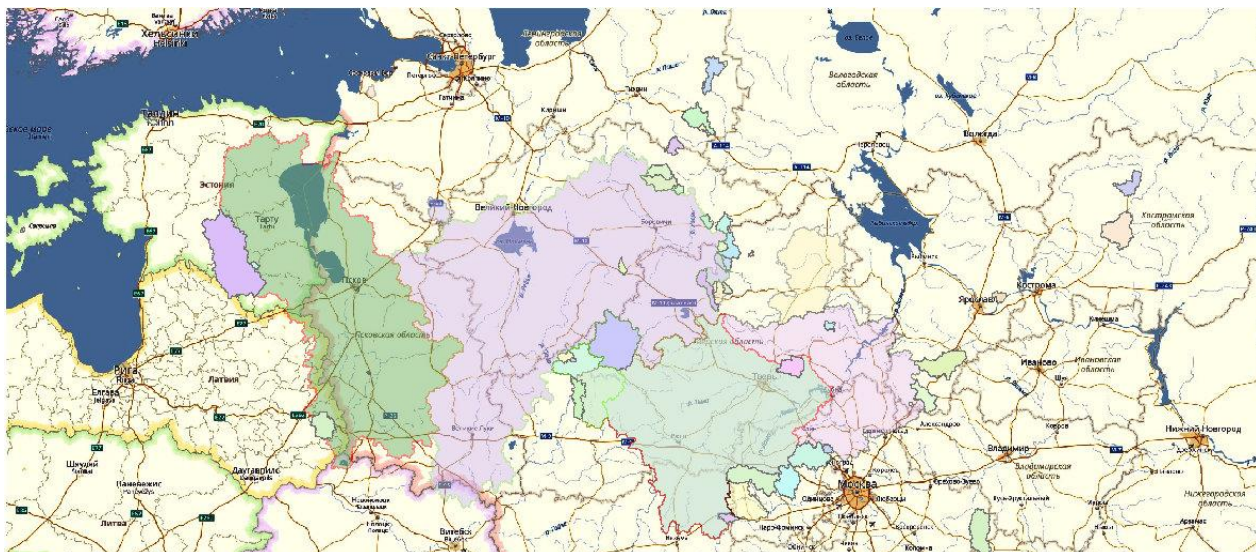


Рисунок 4.21 Территория иссле



Рисунок 4.22 Водосбор оз. Чудско-Псковского, включая оз. Выртъярв

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.

1. Догановский, А.М. Гидрология суши[Текст]. -- СПб.: РГГМУ, 2012.- 523 с.
2. Влацкий,В.В. Моделирование речного стока с использованием ГИС-технологий[Электронный ресурс].– Оренбургский научный центр УрО РАН.– Оренбург,2010.–режим доступа: http://vestnik.osu.ru/2010_9/19.pdf
3. ArcGISResources: Примеры практического применения гидрологического анализа [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#/009z0000005z000000/>
4. 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/>
5. А.А.Соколов, Гидрография СССР[Текст].– Л.: Гидрометиздат,1952. – режим доступа: <http://abratsev.ru/biblio/sokolov/content.html>
6. Ресурсы поверхностных вод СССР [Текст].Т. 10. Верхне-Волжский район. В 2-х кн., кн.1/ Под редакцией Ю.Е. Яблокова.–М.: Гидрометеиздат МО, 1973.–476 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 2. Карелия и Северо-Запад. Часть 1[Текст]. Л.: Гидрометеиздат, 1972
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 10. Верхне-Волжский район. Часть 3. Описания отдельных рек и озер[Текст]. Л.: Гидрометеиздат, 1972 г.
9. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1990, ч.2 озера и водохранилища Т.1,вып.5[Электронный ресурс]/Под редакцией З.В. Ремезова.–СПб.: СЗ Гидромет.–2000.–режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/441964/>

10. Wikipedia, Валдайское озеро[Электронный ресурс].–режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Валдайское_озеро
11. Озера и реки Валдая[Электронный ресурс].–Сайт города Валдай., Валдай 18 июня 2008г.–режим доступа:<http://valday.com/lakes>
12. Wikipedia, озеро Ильмень [Электронный ресурс].–режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ильмень>
13. Wikipedia, Охват(озеро) [Электронный ресурс].–режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Охват_\(озеро\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Охват_(озеро))
14. Галанин,А.В. Древние водные пути из Новгорода на Ильмене на Волгу//Вселенная живая[Электронный ресурс].Владивосток,2012.–режим доступа: <http://ukhtoma.ru/volok13.htm>
15. Wikipedia, Песьво(озеро) [Электронный ресурс].–режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Охват_\(озеро\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Охват_(озеро))[http://ru.wikipedia.org/wiki/Песьво_\(озеро\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Песьво_(озеро))
16. Федеральный портал protown.ru [Электронный ресурс].– режим доступа: http://protown.ru/information/hide/hide_2482.html
17. Грачев, А. О некоторых озерах Костромской губернии. Москва. 1902 год. [Электронный ресурс].- режим доступа: http://nipol.ucoz.ru/load/kostromskaja_guberni/obshhie_svedenija/o_nekotorykh_ozera_kh_kostromskoj_gubernii/204-1-0-4870
18. Словарь современных географических названий.–Екатеринбург: У-Фактория. Под ред. Акад. В.М.Котлякова,2006.–режим доступа:http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geo/1167/%D0%92%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BD%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%B6%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5
19. Wikipedia, Можайское водохранилище [Электронный ресурс].–режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Можайское_водохранилище

20. ArcGISResources: Что такое цифровые модели рельефа [Электронный ресурс].–Режим_доступа:
resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#//009z00000005n000000/
21. Геокосмос Цифровая модель рельефа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geokosmos.ru/services/dtm/>
22. Тикунов В. С. Геоинформатика, МГУ, 2004 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://edu-knigi.ru/tikunov/geoinformatika.php>
23. Костин А. В. Цифровая модель рельефа (Методы создания и направления использования) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://st-yak.narod.ru/pdf/20-5.pdf/>
24. Описание и получение данных SRTM[Электронный ресурс].– Режим_доступа: <http://www.gis-lab.info>
25. SASGIS: [[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sasgis.org/sasplaneta/>
26. Лаборатория АгроГИС-технологий: Советы по работе с ArcGIS[[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://npk-kaluga.ru>
27. ArcGISResources: Расширение шейп-файлов [Электронный ресурс].– Режим_доступа:
<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#//005600000003000000/>
28. ArcGISResources: Как работает инструмент Заполнение(Fill) [Электронный ресурс].–Режим_доступа:
<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#/na/009z000000061000000>
29. ArcGISResources: Как работает инструмент Направление стока (Flow Direction) [Электронный ресурс].–Режим_доступа:
<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#/na/009z000000063000000>
30. ArcGISResources: Как работает инструмент Суммарный сток (Flow Accumulation) [Электронный ресурс].–Режим_доступа:
<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#/na/009z000000062000000>

31. Гидрологическая изученность. Том 10. Верхне-Волжский район. [Текст]. Л.: Гидрометеиздат, 1966.
32. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши Т1 вып.5 Бассейн рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер [Текст]. Л.: Гидрометеиздат, 1986.