

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



КОРОТИН Антон Сергеевич

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ
ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА**

2.5.1 – Инженерная геометрия и компьютерная графика.
Цифровая поддержка жизненного цикла изделий

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Е. В. Попов

Нижний Новгород – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЛЬЕФА	9
1.1. Использование открытых цифровых моделей рельефа в территориальных исследованиях	9
1.2. Методы интерполяции, используемые при построении поверхностей рельефа .	15
1.2.1. Принципы обработки матриц высот при восстановлении поверхности.....	15
1.2.2. Метод нерегулярной триангуляционной сетки (Triangulation Irregular Network, TIN)	18
1.2.3. Метод обратных взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting, IDW) ...	19
1.2.4. Метод естественного соседства (Natural Neighbor, NN).....	22
1.2.5. Методы Кригинга (Kriging)	23
1.2.6. Метод радиальной базисной функции (Radial basis functions, RBF)	24
1.3. Обработка и представление моделей рельефа SRTM и AsterGDEM в ГИС	24
1.3.1. Регулярные модели рельефа	25
1.3.2. Нерегулярные модели рельефа.....	27
1.3.3. Модель AsterGDEM.....	28
1.3.4. Модель SRTM DEM	30
1.4. Выводы по главе	32
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА.....	34
2.1. Общие вопросы оценки точности	34
2.2. Методы анализа качества матриц высот	40
2.2.1. Метод сравнения с использованием изолиний	40
2.2.2. Метод сравнения с использованием контрольных точек	47
2.3. Методика оценки точности ЦМР	54
2.4. Выводы по главе	56
ГЛАВА 3. КОРРЕКТУРА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА И ИХ ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА	58
3.1. Корректурa матриц высот по поверхности отклонений из контрольных точек	58
3.2. Распознавание растительных массивов на космических снимках (NDVI)	66
3.3. Верификация полученных данных и сравнение параметров реальной поверхности и ее измененной модели	69

3.4. Корректурa по элементам (с учётом растительного покрова)	73
3.5. Трёхмерная визуализация объектов бассейновых ГИС	78
3.5.1. Общие вопросы формирования стереоскопических изображений.....	78
3.5.2. Оптимизация параметров построения стереоизображений-анаглифов цифровой модели рельефа	82
3.5.3. Создание стереоскопических изображений цифровых моделей местности ..	86
3.6. Выводы по главе	90
ГЛАВА 4. РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ НА БАЗЕ ПРИВЕДЁННЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА В БАСЕЙНОВЫХ ГИС	92
4.1. Определение основных морфометрических характеристик бассейна реки (на примере реки Кудьма Нижегородской области)	92
4.1.1 Средняя высота	93
4.1.2 Средний угол наклона	94
4.1.3 Вычисление площади топографической поверхности и объёмов	95
4.1.4 Изрезанность очертаний, расчленённость и извилистость	96
4.2. Построение гидрографической сети.....	102
4.3. Экспериментальная разработка - бассейновая ГИС для оценки ущерба от затопления территории	107
4.4. Выводы по главе	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Копии актов внедрения	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ	144
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Актуализация данных и определение периода их обновлений.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Коэффициенты, только ограничивающие функцию интерполяционного полинома Лагранжа при значении переменной «0»	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Геоинформационная система бассейна водного объекта	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Требования, предъявляемые к модели бассейновой гидрографической сети.....	149

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Принципиально важными преимуществами географических информационных систем (ГИС) над «традиционными бумажными» картографическими материалами являются возможность пространственного геометрического моделирования исследуемых объектов и оперативная визуализация моделей. Наиболее сложным из составных частей координатного описания объекта в пространстве является его высотное расположение относительно какой-либо поверхности относимости. Использование геоинформационных систем позволяет обрабатывать намного большие массивы данных, чем средства «традиционной бумажной» картометрии. Открытые пространственные данные, полученные с использованием дистанционного зондирования Земли, позволяют создавать приближенные цифровые модели рельефа (ЦМР) на любую территорию.

На основе таких ЦМР в свою очередь может выполняться оперативное геометрическое моделирование и прогнозирование развития тех или иных явлений и процессов (в том числе чрезвычайных ситуаций), применительно к различным отраслям народного хозяйства, а также планирования и прогнозирования комплексного развития территорий и её ресурсного потенциала с целью решения задачи рационального природопользования и устойчивого развития. В то же время, качество решения аналитических задач с использованием ЦМР в значительной степени зависит от объективности и достоверности исходных данных, из которых максимально должны быть исключены любые посторонние погрешности, шумы и элементы субъективности.

Степень разработанности объекта исследования. Проблеме моделирования и математического описания цифровых моделей рельефа, в том числе в ГИС, посвящены труды как отечественных (Баранов Ю. Б., Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Мусин О. Р., Павлова А. Н., Скворцов О. В., Тикунов В. С., Флоринский И. В., Хромых В. В., Хромых О. В., Ястребов А. И. и др.), так и зарубежных учёных (Алиас А-Р., Маруяска Т., Мурай С., Рубиано Й., Нелсон А., Накамура Х., Фарров А., Муллиган М., Тачикава Т., Ярвис А. и др.).

Большинство исследований в этой области посвящено таким проблемам, как: анализ топографических поверхностей (Орлова Е. В., Павлова А. И., Сосновский А. В., Коберниченко В. Г. и др.); геоморфометрия и гидрология (Флоринский И. В., Еттрич Г., Махалингам Б. Р., Марчесини И., Морисава М. и др.); трёхмерное моделирование рельефа

по картографическим материалам и данным дистанционного зондирования Земли для решения прикладных отраслевых задач (Корытный Л. М., Мозжерин В. И. и В. В., Ермолаев О. П., Орлова Е. В., Яковченко С. Г. и др.). Как показали исследования последних лет, оценке основных характеристик (точность, наличие случайных или систематических погрешностей, степень близости к физической поверхности рельефа и пр.) моделей рельефа (общедоступных матриц высот, полученных дистанционными методами) не уделено должного внимания.

Объект исследования. Цифровые модели рельефа местности, полученные методами дистанционного зондирования Земли.

Предмет исследования. Методы повышения точности и достоверности цифровых моделей рельефа.

Цель исследования. Разработка методов повышения точности и достоверности открытых цифровых моделей рельефа, полученных по данным дистанционного зондирования Земли, при решении теоретических и прикладных отраслевых задач в бассейновых ГИС.

Задачи исследования:

1. Разработать методику оценки качественных и количественных характеристик, открытых цифровых глобальных моделей рельефа, используя основные принципы теории математической обработки геодезических измерений и теории ошибок измерений.
2. Разработать и обосновать метод коррекции и восстановления данных для построения трёхмерных моделей рельефа.
3. Разработать алгоритм формирования цифровой модели стереоизображения-анаглифа ЦМР, обеспечивающей возможность адекватного и достоверного определения высотных параметров элементов изображения при реализации его в виде твердой копии для решения аналитических инженерных задач.

Научная новизна исследования:

1. Разработана методика оценки точности глобальных цифровых моделей рельефа, которая отличается от созданных ранее и используемых в настоящее время тем, что позволяет одновременно выполнить оценку точности поверхности, с применением принципов теории математической обработки геодезических измерений и теории ошибок измерений, и получить матрицу коррекции для её исправления средствами

геоинформационных систем на обширные территории с использованием малого числа контрольных данных.

2. Разработан и обоснован метод корректуры и восстановления матриц высот, позволяющий повысить точностные характеристики глобальных цифровых моделей рельефа с ± 8 м до ± 2 м по высоте на открытых участках, и с ± 20 м до $\pm 2,5$ м на землях, занятых лесной растительностью, для получения морфометрических и гидрологических характеристик.

3. Разработан алгоритм формирования цифровой модели стереоизображения-анаглифа ЦМР, обеспечивающей возможность адекватного и достоверного определения высотных параметров элементов изображения при реализации его в виде твердой копии для решения аналитических инженерных задач и восприятия пластики рельефа местности в полевых условиях.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты, выполненных исследований по повышению точности и достоверности геометрического моделирования рельефа вносят вклад в развитие теории изображений и методов её применения геометрических моделей, в том числе, фотограмметрии, и их использования при моделировании; развивают применения геометрических моделей и методов в информационных (включая геоинформационных) технологиях и системах.

На базе восстановленной ЦМР бассейна реки Кудьма была построена гидрографическая сеть, использование которой необходимо для расчётов зон распространения загрязнений в виде сбросов в водный объект от опасных и вредных промышленных производств.

Предложенный подход к формированию цифровых моделей рельефа использован при предварительном определении площадей земель подверженных затоплению, в связи с дальнейшим развитием и эксплуатацией Чебоксарской ГЭС, в части строительства низконапорного гидроузла в районе города Нижнего Новгорода и Балахнинского района Нижегородской области.

Восстановленные ЦМР могут быть использованы для: оценки возможных последствий возникновения чрезвычайных ситуаций при их моделировании на физической поверхности земли; прогнозирования развития эрозионных почвенных процессов; разработки мероприятий по рациональному использованию ресурсного потенциала

территории и его оценки; расчёта сил и средств для ликвидации возможных аварий; представления трёхмерных моделей рельефа средствами изображений-анаглифов и т.д.

Результаты исследований используются в деятельности Верхне-Волжского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов, Министерства экологии и природных ресурсов Нижегородской области и ООО «Аэрогеодезия».

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использованы экспериментальные, экспериментально-аналитические и информационно-вычислительные методы в сочетании с геометрическим и математическим методами для картографии и обработки открытых данных дистанционного зондирования Земли средствами геоинформационных систем. Также применены и использованы методы теории математической обработки геодезических измерений, цифровой обработки изображений, математического и геометрического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценки точности цифровых глобальных моделей рельефа.
2. Метод корректуры и восстановления цифровых моделей рельефа с использованием различных методов формирования поверхностей.
3. Процедура формирования твердых копий стереоизображений-анаглифов ЦМР, обеспечивающих возможность адекватного и достоверного определения высотных параметров элементов изображения для решения аналитических инженерных задач.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается корректным применением математического аппарата интерполяции, который основан на формуле Лагранжа и согласованностью полученных результатов с другими известными результатами и натурными измерениями.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 24-й, 25-й и 26-й международных конференциях по компьютерной графике и машинному зрению «ГрафиКон» (г. Ростов-на-Дону, 2014, г. Москва-Протвино, 2015, г. Нижний Новгород, 2016), ежегодных международных научно-промышленных форумах «Великие реки» (г. Нижний Новгород, 2013-2017), ежегодных региональных научно-практических конференциях «Культура управления территорией: экономические и социальные аспекты, кадастр и геоинформатика» (г. Нижний Новгород, 2013, 2015-2016, 2020), международной конференции «Стойкость сложных социо-техногенных систем – Resilience» (г. Москва-

Протвино, 2014), III международной научно-технической конференции «Проблемы машиноведения» (г. Омск, 2019).

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа по своему содержанию, целям, задачам, методам исследования и научной новизне соответствует научной специальности 2.5.1. «Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделия» по пунктам: п. 1 – Теория изображений и методы ее применения в процессах построения геометрических моделей и определения геометрических параметров объектов, в том числе методами фотограмметрии; п. 2 – Теория и практика непрерывного и дискретного геометрического моделирования. Конструирование кривых линий, поверхностей и тел по заданным требованиям; п. 9. – Применение геометрических моделей и методов в информационных (включая геоинформационных) технологиях и системах.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 24 научных трудах, 4 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК по научной специальности 2.5.1 (три уровня К2 и одна К3), 3 в изданиях, проиндексированных базой данных Scopus, 17 в сборниках научных трудов и конференций, 1 – монография, 1 – свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка использованных литературных источников из 250 наименований, в том числе 166 иностранных, и приложений. Работа содержит 150 страниц текста, в том числе 118 страниц основного текста, 62 рисунка и 17 таблиц.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЛЬЕФА

1.1. Использование открытых цифровых моделей рельефа в территориальных исследованиях

В недавнем времени отсутствие цифровых моделей рельефа, имеющих глобальное покрытие вызывало затруднения в проведении исследований в гидрологии, гидродинамики, геостатистики, геоморфологии, экологии, сельском хозяйстве, геодезии и других науках, где сведения о поверхности рельефа являются одним из основополагающих пространственных базисов. Несмотря на появление моделей рельефа охватывающих большую часть континентов, вопрос о качестве материала остается открытым.

Используемые сегодня цифровые модели рельефа в ГИС различной тематической направленности, где необходимо наличие данных о рельефе местности, в основном получены с использованием дистанционного зондирования Земли [167, 201]. Цифровые модели рельефа (ЦМР, DEM) необходимо рассматривать в качестве поверхностей рельефа без каких-либо объектов, будь то растения или здания и сооружения [120]. Как отмечают Бейтс [95] и Ярихани [153] качественные цифровые модели рельефа являются одними из определяющих и важнейших составляющих гидрологических и гидродинамических моделей.

Для прогнозирования территорий, подвергающихся, в частности, затоплениям необходимо их качественное распознавание и классификация. В силу этого, классификация изображений природных и антропогенных объектов на спутниковых снимках остается актуальной задачей при построении карт [9, 65]. Так, в частности, в исследованиях, посвященных прогнозированию развития роста лесных массивов на неиспользуемых сельскохозяйственных землях, значительное место уделялось автоматизации [8]. Ряд исследований [103, 154, 163, 168, 238] описывает возможные способы распознавания на спутниковых снимках сельскохозяйственных культур. Выбор алгоритмов классификации зависит от вида классифицируемых природных ресурсов, технологических и технических возможностей.

Имеющиеся сегодня цифровые модели рельефа, полученные по данным ДЗЗ и являющиеся наиболее доступными и исследованными – это SRTM и Aster [63, 64, 92, 156, 203, 239, 241]. Кроме указанных общедоступных ЦМР, имеются также коммерческие продукты типа WorldDEM от компании Airbus Defence and Space или NextMap World 10 и

NextMap World 30 от компании Intermap и др. Исследования о качестве цифровых моделей рельефа, в основном сосредоточены на анализе общедоступных (открытых) моделей и сравнении их характеристик на различных участках земной поверхности [92, 226]. Многими отмечено, что эти модели не отвечают требованиям гидрологической корректности за счет наличия ошибок различного происхождения, которые обычно разделяют на две пространственные компоненты: плановые и высотные [108, 122]. К основным ошибкам распространенных ЦМР относятся искажение углов наклона и абсолютной высотной составляющей на участках, занятых лесной растительностью [30, 36, 78, 92, 96, 165, 210], которые не полностью исключены в процессе обработки исходных данных ДЗЗ [111, 120, 142, 147, 183]. Для исключения ошибок, связанных с наличием растительного покрова на цифровых моделях местности, для построения 2D сетки водотоков, Хуили был предложен метод гидравлической коррекции, основанный на использовании легкодоступных данных и автоматизированных алгоритмов обработки данных средствами ГИС [147].

Кроме лесной растительности Ямазаки [239], Такаку [221], Зандбергенем [245] и Хиртом [142] отмечается наличие стохастических всплесков, вызванных изменением отражательной способности поверхности при разновременной регистрации показателей датчиками, установленными на спутниковых аппаратах. В работах этих авторов также отмечается наличие максимальных искажений на участках стыковки полос сканирования земной поверхности [75, 110, 131, 191, 224, 239], а также наличие общего абсолютного смещения модели по высоте в ту или иную сторону, которое, в связи с использованием различных данных со своими абсолютными смещениями, не является постоянным в пределах некоторой территории, но может быть вычислено с высокой точностью [120, 202, 239]. Для идентификации артефактов различного происхождения в 2017 году Кристианом Хиртом [142] было предложено использовать метод максимального наклона, опирающийся на вычисление градиентов наклона поверхности с максимальными показателями и дальнейшее их дешифрирование.

Якобсен [151], Жао [246] и Ли [166] отмечают, что модель SRTM значительно превосходит Aster на участках со спокойным рельефом, а в горных районах имеет значительные ошибки. По словам Яна [230] модель SRTM в отличие от Aster имеет меньшее число ошибочных значений и довольно стабильную точность. Тачикава [218, 219] и Мукерджи [180] отмечают, что модель Aster, имеет большое число аномалий и шумов, которые затрудняют проведение исследований и существенно влияют на получаемые

результаты, но при определенных условиях могут быть использованы в построении моделей.

Во многих современных исследованиях [61, 62, 170, 171, 175], при построении моделей территорий и выполнении аналитических определений и построения различных моделей, для определения морфометрических показателей, происходит непосредственно на неоткорректированных данных и несёт в себе определённые погрешности [36, 171, 198]. Вероятность такого отношения к материалам скорее связана с тем, что авторами исследуются большие территориальные единицы и доля ошибочно полученных данных очень мала по отношению к общему объёму [99, 162].

Цифровые высотные модели рельефа, получаемые с использованием дистанционного зондирования Земли, в настоящее время нашли широкое применение при мониторинге изменений уровня воды в озерах и водохранилищах [106], определении поведения паводковых вод в бассейнах рек [79], оценке болезней сельскохозяйственных культур, определении качественных и количественных характеристик лесных территорий [79, 217], оценке землепользования и картировании археологических объектов и т.д. Все перечисленные исследования предполагают использование методов морфометрического анализа топографических форм земной поверхности [6, 71, 72, 78, 99, 121, 129, 171, 173, 179], основанных на классических картометрических и геометрических измерениях и преобразованиях. При этом, как уже было отмечено, качество анализа в значительной степени зависит от объективности и достоверности исходных данных, из интерпретации которых в максимальной степени должны быть исключены любые посторонние погрешности, шумы и элементы субъективности.

В 2017 году группой ученых [239] была подготовлена откорректированная модель DEM в которой исправлены все основные компоненты ошибок для выполнения гидравлических расчетов, где участки, занятые растительностью не вовлечены в фактический расчет, а использованы в качестве поверхности для определения связи стока водных объектов [147]. Многие научно-исследовательские учреждения также готовили свои версии ЦМР, для использования при решении прикладных задач, из состава которых, по их утверждениям, исключены те или иные ошибки [97, 154, 200, 201, 239]. Восстановлением и повышением качества открытых цифровых моделей рельефа занимаются Рейтер [200], Арефи [88], Юэ [242] и Робинсон [201].

Основная часть исследований в получении качественных характеристик ЦМР, выраженных численно в виде ошибки (обычно – СКП, RMSE), опираются на использование эталонных значений высот, полученных натурными измерения спутниковым навигационным оборудованием или путем идентификации их на топографических планах или картах [101, 134, 136, 164].

Рейтер [200] предложил использовать для восстановления ЦМР в местах отсутствия измерений и на сшивках дополнительные источники информации с использованием различных интерполяционных алгоритмов кригинга или обратных взвешенных расстояний для пустот небольших и средних размеров в относительно равнинных областях; сплайновую интерполяцию для пустот малых и средних размеров в высотной и расчлененной местности; нерегулярную триангуляционную сеть или метод обратных взвешенных расстояний – для пустот больших размеров в очень плоских областях, и расширенный метод сплайна (ANUDEM) для пустот больших размеров в других местах.

Арефи и Рейнарц [88] для восстановления ЦМР предложили метод повышения качества данных Aser путем коррекции ошибок с использованием данных лазерной альтиметрии IceSat и устранения артефактов и аномалий на основе алгоритма сегментного обнаружения и устранения выбросов. Тем не менее, артефакты, содержащие более низкие значения высоты по отношению к соседним пикселям поверхности, не полностью устраняются из-за сложности интерпретации объектов, не относящимися к местности, а также недостаточностью плотности данных лазерной альтиметрии IceSat.

Робинсон [201] в своей работе предложил использовать совместно Aster GDEM v2 и CGIAR-CSI SRTM v4.1, а на участках сшивки применить метод основанный на круговом распределении влияющих значений пикселей модели дополненный коэффициентами с экспоненциальным распределением.

Юэ [241] предложено одновременное использование моделей данных SRTM-1, Aster GDEM v2 и IceSat для заполнения пустот в модели и ее коррекцию с последующей фильтрацией.

Среди представленных работ имеются некоторые особенности: во-первых, все исследования направлены на корректировку модели рельефа в целом, в общем объеме предоставляемых данных, и не концентрируются на локальных участках местности; во-вторых, большинство исследований используют для работ модели SRTM и Aster; в-третьих, во всех работах для восстановления одной матрицы высот используется некоторая другая

DEM. Учитывая это, можно сказать, что восстановление отсутствующих значений высот, устранение артефактов различного происхождения и составление единой бесшовной модели рельефа остается сложной и актуальной задачей.

Качество и достоверность морфометрического анализа в наибольшей степени зависит от качества трехмерных моделей рельефа местности. Однако имеющиеся в сети интернет данные ДЗЗ в большинстве случаев содержат ошибки, вызванные наличием на местности лесных массивов, возведенных строений и прочих объектов, что существенным образом влияет на точность анализа. Решение задачи, связанной с получением качественной модели рельефа связано с выявлением и частичным исключением или максимальным снижением влияния случайных ошибок (погрешностей), получаемых в процессе геодезических измерений дистанционными методами [3, 44, 97, 154, 175, 200, 201, 239].

Учитывая тесную историческую связь морфометрии с картографией, морфологией, математикой и теорией измерений, а также сильную дифференциацию между зарубежной и отечественной научными школами, сегодня все еще не существует единой стандартизированной классификации морфометрических характеристик рельефа бассейна водного объекта, что создает определенные трудности их использования для оценки территории. Однако наиболее распространенные характеристики, для определения которых разработаны наиболее объективные методы вычислений, структурно изложены в научных исследованиях Вахтина Б.М [6], Ефремова Ю.К. [16] и Симонова Ю.Г. [71]. Современные методы обработки данных позволяют получать численные показатели морфометрии на любые интересующие территории, для которых создана цифровая модель рельефа, имеющая максимальное подобие действительной поверхности земли [10].

Морфометрия представляет собой топографическое описание земной поверхности посредством математических законов и геометрических величин: площадей, уклонов, формы, длин т.д. [2, 6, 66, 72, 78]. Эти параметры позволяют оценивать речные водосбросы в различных состояниях, включая обмеления, паводки и пр., что отмечено в гидрологических исследованиях Джонса [158]. Влияние этих параметров на ландшафт ранее отмечал и Морисава [179], который пришёл к выводу, что поток может быть выражен как общая функция от геоморфологии водораздела. Эта точка зрения сохраняется и в настоящее время, как отмечают Джейн и Синха [152], Ококо и Олюджими [186] и Ифабии [145], Хуили и др. [147] – геоморфологические характеристики дренажного бассейна играют ключевую роль в контроле бассейновой гидрологии. Морфометрический анализ дренажных бассейнов,

таким образом, обеспечивает не только эlegantное описание пейзажа, но и служит мощным средством сравнения формы и процессов водосборных бассейнов не только в пространстве, но и во времени, что было отмечено Истернбруком [117]. Все выше описанные исследования опираются на принципы математизации научных исследований и выражению качественных показателей территории в виде количественной величины [101, 134, 136, 164].

Ранее, большинство бассейнов водных объектов описывалось либо как хорошо или плохо дренированные (осушенные), либо, согласно схеме Дэйвиса, описывались как молодые, зрелый или старый, основываясь на исследованиях Грегори и Уоллинга [137]. Механика того, как речные русла фактически образуются в пределах речного бассейна и как вода попадает в них, понималась геологами и гидрологами лишь в расплывчатых терминах. Измерение и количественное описание водосборного бассейна фактически внедрилось с появлением работы Джеймса Хаттона в 1775 году. Впоследствии, большой шаг вперед был сделан Хортоном в работе об исследовании бассейновых характеристик [115], где он, опираясь на предыдущие работы, добавил новые измеряемые характеристики и предложил общие методы описания параметров водосборного бассейна, которые использовались Грегори и Уоллингом [137]. С тех пор, математический анализ водосборного бассейна широко применяется, как в умеренной зоне, что отражено в исследованиях Шумма [206], Соколова [213], Гардинера [133], так и во влажных тропиках, исследованиями которых занимаются Хьюлетт и Хибберт [140]; Эбисемиджу [119], Нва [182]; Адеджувон, Джеджей и Огинкя [86], Рэймонд, Айандайк и Фил-Эз [198], Ифабии [150].

Морфометрические характеристики водосбора подвержены пространственно-временным изменениям, поэтому детальное исследование характеристик бассейна, необходимо проводить не только между разными областями, но и время от времени. Периодизация исследований опирается на фундаментальные принципы динамики развития территорий и обновления материалов территориального моделирования в виде картографических материалов, получаемых различными способами (Приложение А). Это является важным, поскольку форма бассейна в терминах его морфометрических характеристик определяет и процессы, происходящие в данном бассейне. Кроме того, все исследования рассматриваются в рамках ранжирования сети водотоков по принципу, предложенному Хортоном в работе [145] и усовершенствованном Стралером в 1957 [216], при котором численные показатели отдельно взятых бассейнов могут значительно отличаться от среднего их числа, а площади частных водосборов различаться в десятки раз

и, тем самым, не давая оптимальной оценки всему бассейну. Херитич Джордж, Дэвид Дж.Милан, Эндрю Лардж, Иэн Фуллер, [139, 176] в своих исследованиях отмечают, что точность получаемых показателей, при изучении морфологии и морфометрии, напрямую зависит от качества исходной модели рельефа и от методов, используемых при интерполяции данных. В их работах также отмечены особенности выполнения оценки точности моделей рельефа, полученных по данным наземного лазерного сканирования.

1.2. Методы интерполяции, используемые при построении поверхностей рельефа

1.2.1. Принципы обработки матриц высот при восстановлении поверхности

При графических аналитических исследованиях земной поверхности, её удобно представлять в виде двумерной растровой матрицы, в которой каждый элемент несёт в себе определённую информацию [70, 90, 241]. Далее, говоря о моделях земной поверхности, будем иметь ввиду именно матричное представление информации. Каждый элемент такой матрицы является аналогом пикселя изображения или элементарным объектом (элементом данных) геоинформационной системы, поддерживающей работы с растровыми представлениями информации. В простом случае каждая ячейка имеет одно определённое состояние или значение, в зависимости от дискретного или непрерывного пространства признаков (рис. 1). Более сложные случаи представляют собой матрицы с многомерными элементами. При этом местоположение, конфигурация и размеры исследуемых элементов земной поверхности, моделируются с учётом их взаимного расположения при схожих значениях или состояниях. Мозаичные модели в качестве составных частей могут включать в себя обобщённые и распределённые модели в качестве основных частей и при этом использовать любые из дифференциальных или матричных уравнений [70].

$i \backslash j$	1	2	...	j	...	n	
1	H_{11}	H_{12}	...	H_{1j}	...	H_{1n}	H_{ij} i, j - пространственное положение пикселя k - сведения о высоте пикселя $A_1, A_2, \dots, A_N$ - связанные атрибутивные данные с качественными или количественными характеристиками для решения аналитических операций
2	H_{21}	H_{22}	...	H_{2j}	...	H_{2n}	
...	...	...	...	...	...	...	
i	H_{i1}	H_{i2}	...	H_{ij}	...	H_{in}	
...	...	...	...	...	...	...	
n	H_{n1}	H_{n2}	...	H_{nj}	...	H_{nn}	

Рисунок 1. Пример двумерной матрицы высот с описанием дополнительных атрибутивных данных

Методы интерполяции при восстановлении значений поверхностей рельефа подразделяют на глобальные и локальные интерполяторы [5, 63, 85, 89, 90, 110, 167, 169, 181, 184, 209, 222]. Методы глобальной интерполяции основаны на подборе общей функции на всей окрестности точек и могут быть использованы только для определения систематических или грубых ошибок [89, 104, 157]. Методы локальной интерполяции опираются на определении частных функций по соседним точкам, входящим в ограниченную окрестность [201, 237]. В связи с особенностями использования глобальных интерполяторов (в расчет входит вся выборка точек), они не применяются для восстановления функции высоты на заданной поверхности, но могут быть использованы при оценке точности модели в целом. При восстановлении поверхности рельефа использоваться только методы локальной интерполяции основанные на принципах автокорреляции, которые предполагают, что точки, которые находятся физически близко друг к другу, более похожи, чем точки, которые находятся далеко друг от друга или, можно сказать, что степень изменения между значениями пропорциональна расстоянию между ними, как отмечает Паттатал Арун [89].

Главным недостатком методов локальной интерполяции Х. И. Рейтер, А. Нельсон и А. Джарвис [200] считают использование ограниченного количества входных данных для применения функции интерполяции. Поэтому входные данные, используемые для вычисления каждой функции, образуют «окно», которое перемещается по набору. По сравнению с глобальными, локальные методы обычно дают менее гладкие поверхности. Они не так чувствительны к резким изменениям высоты, потому что их влияние не

распространено на всю интерполированную поверхность, а только на локальные участки. Сложность использования методов локальной интерполяции заключается в рациональном (необходимом и достаточном) определении размера «окно поиска» (количество используемых точек данных или радиус поиска) и используемой функции.

С этой целью предлагается вносить поправки, учитывающие значения смежных ячеек с введением весовой функции [17, 21, 90, 201].

Основываясь на принципах мозаичности изображения, можно считать, что каждому пикселю $H_{i,j}$ с позицией (i,j) и с некоторой окрестностью $D = \{H = i,j : 0 \leq i,j \leq D_{nn}\}$ соответствует система соседних точек $\zeta = \{\zeta_H, d \in D\}$, где ζ_H – множество соседних пикселей для пикселя $H_{i,j}$, причём $\zeta_H \subset D, H \notin \zeta_H$ [15]. При таких параметрах с минимальной окрестностью ($D = 1$) общее среднее весовое значение «высоты» пикселя можно представить, как:

$$A_{2(i,j;k=1)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}(A_{1(i\pm 1;j\pm 1)} + A_{1(i\pm 1;j\mp 1)}) + (A_{1(i;j\pm 1)} + A_{1(i\pm 1;j)})}{4 \times \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + 1\right)} \quad (1)$$

где $A_{2(i,j;k=1)}$ – общее среднее весовое значение «высоты» пикселя при всех соседних пикселях (т.е. окрестностью $D = 1$) с $k = 0$. При условии, что вес «целого» смежного пикселя $p_{1(i,j)} = 1$, а диагонального $p_{2(i,j)} = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Вес смежного пикселя в окрестности обратно пропорционален евклидовому расстоянию между ними и вычисляется по теореме Пифагора.

$$p_{n_{i,j}} = \frac{1}{\sqrt{\Delta i^2 + \Delta j^2}} \quad (2)$$

При подобном распространении веса на всё окружении пикселя, величины весов каждого последующего смежного пикселя, при приближении к краю окрестности, будут стремиться к 0 (рис. 2).

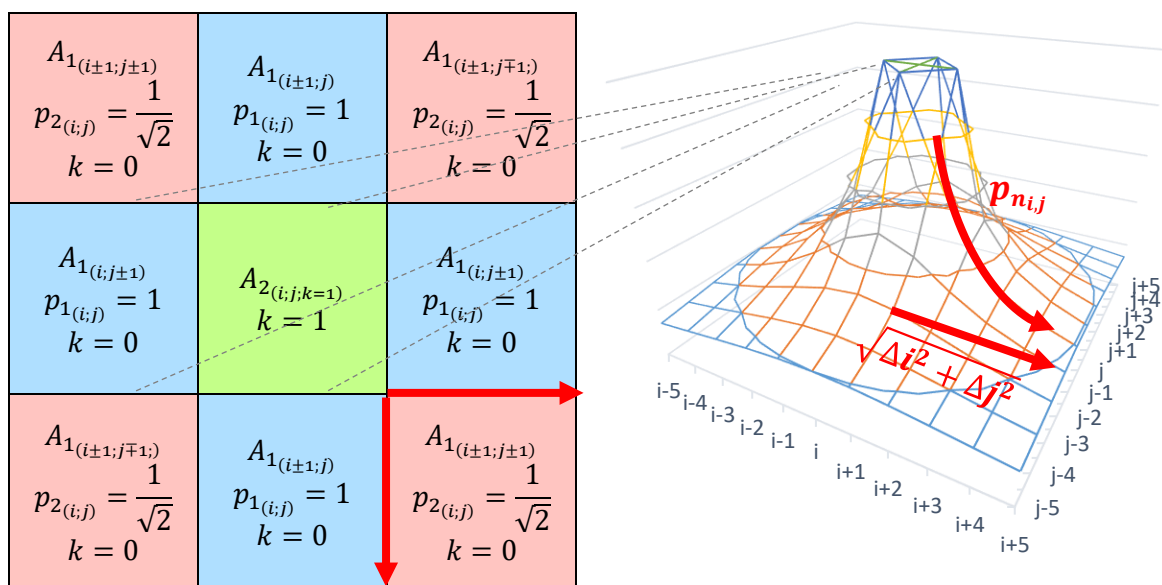


Рисунок 2. Модель и график распределения весового влияния пикселя на значение весовой характеристики искомого

Ченом и Юэ [109] был предложен метод восстановления поверхности рельефа, при котором свойства поверхности не меняются при любых изометрических преобразованиях всего пространства, т.е. они относятся к так называемой метрической поверхности, при этом оценка точности производится с использованием пространственного разрешения модели, а не только переопределенных значений.

1.2.2. Метод нерегулярной триангуляционной сетки (Triangulation Irregular Network, TIN)

Как и любой другой метод интерполяции, метод нерегулярной триангуляционной сетки обеспечивается построением интерполяционной функции. В связи с тесной связью метода TIN с построением полигонов Тиссена, данная функция интерполяции не может быть использована для описания кривизны участков рельефа, т.к. имеет линейную зависимость. Тиссен предложил использовать полигоны как способ интерполирования размеров осадков по нерегулярной сети датчиков для получения объемов в местах, где количество осадков не измерялось. Метод очень прост: чтобы оценить количество осадков в любой точке, используется количество осадков, измеренное по ближайшей шкале. Это приводит к ступенчатой модели, на которой в пределах полигонов, окружающих каждый объект, значение величины постоянно, и резко изменяется при пересечении границ смежных полигонов. Многие пользователи ГИС связывают определенные таким образом полигоны с

Тиссенном, однако они также известны как полигоны Вороного и Дирихле [184, 185, 186]. Метод относится к локальному, точному и детерминистическому интерполятору [222, 235].

1.2.3. Метод обратных взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting, IDW)

Метод обратных взвешенных расстояний однозначно предполагает, что высоты, которые находятся физически близко друг к другу, более подобны, чем высоты точек, которые находятся далеко друг от друга. Чтобы определить значение для неизмеренной точки, метод IDW использует известные значения вокруг интерполируемого местоположения в пределах заданной окрестности [5, 85, 167, 169, 181, 184]. Наиболее близкие точки оказывают большее влияние на прогнозируемое значение, чем удаленные от него на значительное расстояние. Предполагается, что каждая измеренная точка оказывает локальное влияние, которое уменьшается с увеличением расстояния. Это придает больший вес точкам, расположенным ближе всего к интерполируемому местоположению, где вес точки уменьшается как функция от расстояния:

$$H_{i,j} = \sum_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}^{N=D} \left(H_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}} \times p_{N_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}} \right) = \frac{\sum_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}^{N=D} \left(H_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}} \times \frac{1}{d_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}^k} \right)}{\sum_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}^{n=D} \left(\frac{1}{d_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}^k} \right)} \quad (3)$$

где $H_{i,j}$ – искомое значение высоты точки с координатами $\{i, j\}$, лежащей в окрестности $D = \{H = i, j : 0 < i, j < D_{nm}\}$; $p_{N_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}}$ – вес опорной точки; $H_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}$ – известное значение высоты пикселя, расположенного от искомого на расстоянии d ; k – показатель степени при определении весового значения (наиболее часто используется $k = 1$ и $k = 2$).

Веса, назначенные каждой точке окрестности, представленные в виде обратных расстояний, могут быть вычислены как смежные поясные позиции (квадратное распределение) и радиальные распределенные (круговое распределение). Ниже (рис. 3) приведен пример распределения весов пикселей ($p_{N_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}}$) в небольшой окрестности.

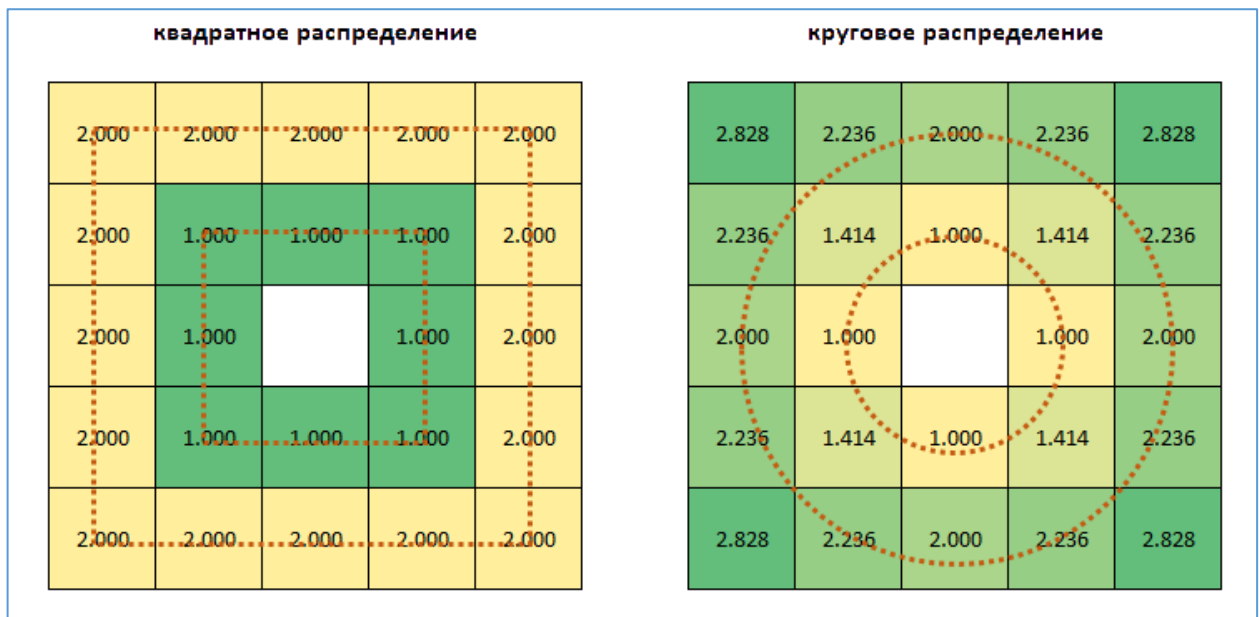


Рисунок 3. Пример распределения значения веса пикселя в методе IDW

Поверхность, рассчитанная с использованием метода IDW, зависит от выбора степени (k) и стратегии поиска окрестности. Кроме того, метод IDW – это жесткий интерполятор, в котором минимальные и максимальные значения на интерполированной поверхности могут встречаться только в опорных точках [63, 90]. Выходная поверхность чувствительна к кластеризации и наличию выпадающих значений, т.к. метод IDW не предусматривает вычисление стандартных ошибок интерполяции. В этой связи, обоснование использования этой модели может быть проблематичным.

Вес пикселя, как уже говорилось ранее, в задаваемой окрестности, обратно пропорционален евклидовому расстоянию между ними. При подобном распространении веса на всё окружении пикселя, величины весов каждого последующего соседствующего пикселя при приближении к краю окрестности будут стремиться к «0» (рис. 4.а-4.в). Весь процесс обработки усложняется тем фактом, что матрица не нормирована, т.е. сумма весов внутри окрестности не будет равна «1», и для получения восстановленного значения высоты требуется предварительное нормирование.

5,66	5,00	4,47	4,12	4,00	4,12	4,47	5,00	5,66
5,00	4,24	3,61	3,16	3,00	3,16	3,61	4,24	5,00
4,47	3,61	2,83	2,24	2,00	2,24	2,83	3,61	4,47
4,12	3,16	2,24	1,41	1,00	1,41	2,24	3,16	4,12
4,00	3,00	2,00	1,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
4,12	3,16	2,24	1,41	1,00	1,41	2,24	3,16	4,12
4,47	3,61	2,83	2,24	2,00	2,24	2,83	3,61	4,47
5,00	4,24	3,61	3,16	3,00	3,16	3,61	4,24	5,00
5,66	5,00	4,47	4,12	4,00	4,12	4,47	5,00	5,66



Рисунок 4.а. Распределение весового влияния пикселя на значение высотной характеристики: значение линейных коэффициентов на единицу длины стороны пикселя (при распределении 9×9)

0,18	0,20	0,22	0,24	0,25	0,24	0,22	0,20	0,18
0,20	0,24	0,28	0,32	0,33	0,32	0,28	0,24	0,20
0,22	0,28	0,35	0,45	0,50	0,45	0,35	0,28	0,22
0,24	0,32	0,45	0,71	1,00	0,71	0,45	0,32	0,24
0,25	0,33	0,50	1,00		1,00	0,50	0,33	0,25
0,24	0,32	0,45	0,71	1,00	0,71	0,45	0,32	0,24
0,22	0,28	0,35	0,45	0,50	0,45	0,35	0,28	0,22
0,20	0,24	0,28	0,32	0,33	0,32	0,28	0,24	0,20
0,18	0,20	0,22	0,24	0,25	0,24	0,22	0,20	0,18

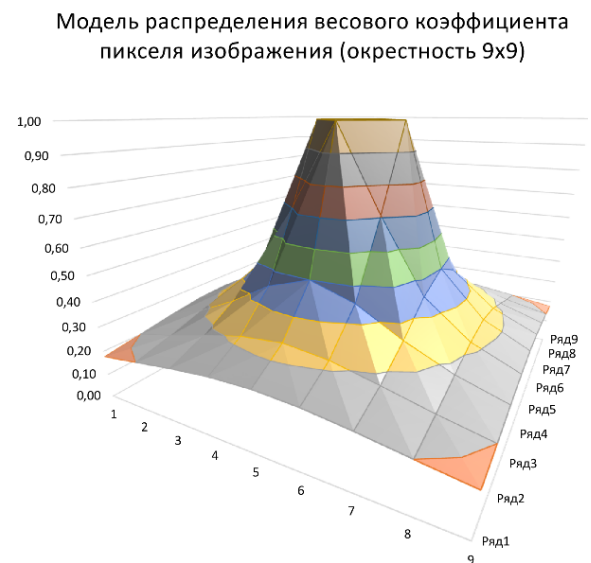


Рисунок 4.б. Распределение весового влияния пикселя на значение высотной характеристики: значения функции веса смежного пикселя (при распределении 9×9)

0,006	0,007	0,008	0,009	0,009	0,009	0,008	0,007	0,006
0,007	0,008	0,010	0,011	0,012	0,011	0,010	0,008	0,007
0,008	0,010	0,013	0,016	0,018	0,016	0,013	0,010	0,008
0,009	0,011	0,016	0,025	0,036	0,025	0,016	0,011	0,009
0,009	0,012	0,018	0,036		0,036	0,018	0,012	0,009
0,009	0,011	0,016	0,025	0,036	0,025	0,016	0,011	0,009
0,008	0,010	0,013	0,016	0,018	0,016	0,013	0,010	0,008
0,007	0,008	0,010	0,011	0,012	0,011	0,010	0,008	0,007
0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

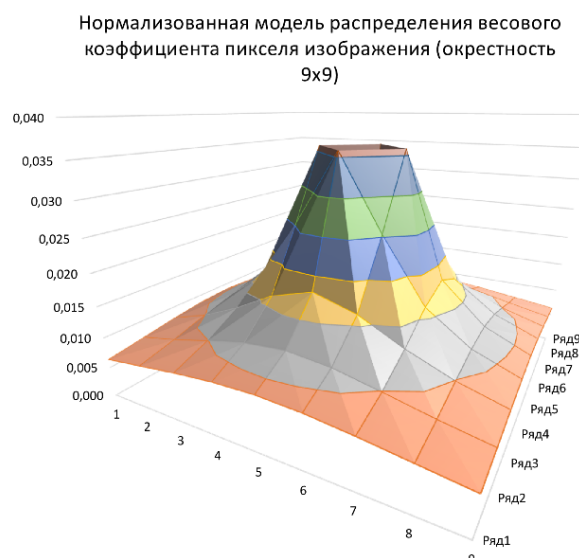


Рисунок 4.в. Распределение весового влияния пикселя на значение высотной характеристики: нормализованные весовые коэффициенты Евклидового распределения (при распределении 9×9)

1.2.4. Метод естественного соседства (Natural Neighbor, NN)

Метод естественного соседства находит наиболее близкое подмножество входных выборок к точке запроса и применяет к ним веса на основе пропорциональных областей для интерполяции значения [209]. Его основные свойства заключаются в том, что он локальный, использует только подмножество выборок, окружающих точку запроса, и интерполированные высоты гарантированно находятся в диапазоне используемых выборок. Он не выводит тренды и не дает пиков, ям, гребней или впадин, которые еще не представлены входными выборками. Ватсон [229] отметил, что данный метод характерен тем, что значение точки при интерполяции будет одинаково при использовании как регулярной, так и нерегулярной сети исходных значений.

Метод довольно популярен во многих областях. При естественной интерполяции соседей, используется набор многоугольников Тиссена (двойственный элемент триангуляции Делоне) чтобы добавить новую точку к набору данных, путем изменения многоугольников Тиссена, некоторые из которых уменьшаются в размере [209]. Алгоритм интерполяции естественных соседей использует средневзвешенное значение соседних наблюдений, где веса пропорциональны «заимствованной области» [93, 209, 222].

1.2.5. Методы Кригинга (Kriging)

Кригинг был принят для обозначения свойства ряда алгоритмов пространственной регрессии. Сам метод формирования уравнения интерполирующей функции подобен методу IDW в том, что он использует веса окружающих значений, чтобы получить прогноз для неизмеренного местоположения [104]. В общем виде формула Кригинга определяется как:

$$H_{i,j} = \sum_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}^{N=D} \left(H_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}} \times \lambda_{\substack{N_{0 < i < m} \\ 0 < j < n}} \right) \quad (4)$$

где $H_{i,j}$ – искомое значение высоты точки с координатами $\{i, j\}$, лежащей в окрестности $D = \{H = i, j : 0 < i, j < D_{nm}\}$; $\lambda_{\substack{N_{0 < i < m} \\ 0 < j < n}}$ – неизвестный вес опорной точки; $H_{\substack{0 < i < m \\ 0 < j < n}}$ – известное значение высоты пикселя.

В зависимости от используемых функций при определении весов сегодня существует большое семейство кригингов, каждый из которых применяется при проведении конкретных геоинформационных анализов: простой кригинг (Simple Kriging, SK), обычный кригинг (Ordinary Kriging, OK), универсальный кригинг (Universal Kriging, UK), точечный кригинг (Point Kriging, PK), блочный кригинг (Block Kriging, BK) и пр. [90].

Все модели семейства кригинга сводятся к регрессионной оценке:

$$V^*(x) - m(x) = \sum_{i=1}^n (\lambda_i(x) \times [V(x_i) - m(x_i)]) \quad (5)$$

где $\lambda_i(x)$ – веса, присваиваемые данным $V(x_i)$, которые в свою очередь являются реализациями пространственной переменной V [20].

Условие несмещенности для уравнения кригинга выполняется в случае, если сумма весов равняется «1», т.е.:

$$1 - \sum_{i=1}^n [\lambda_i(x)] = 0 \quad (6)$$

Циммерман [249] и Арун [89] в своих исследованиях отмечали что методы кригинга позволяют получить более хороший результат интерполяции высоты при восстановлении значений чем IDW вне зависимости от формы рельефа.

1.2.6. Метод радиальной базисной функции (Radial basis functions, RBF)

Метод радиальной базисной функции относится к группе методов с жесткой интерполяцией, который учитывает каждый элемент окрестности и является специальным случаем сплайн-интерполяции. Пателем и Катъяром выделено пять различных базисных функций: плоский сплайн, сплайн с натяжением, полностью регуляризованный сплайн, функция мультиквадриков, функция обратной мультиквадрики.

Каждая базисная функция имеет различную форму и позволяет получать разные интерполированные поверхности [87].

Особенностью метода является уменьшение общей кривизны поверхности (сглаживание). Выбор базисной функции определяет то, как сглаживающая поверхность будет расположена между значениями. Обязательным условием, является то, что поверхность проходит через все исходные значения данных, при этом, в отличие от других методов, с помощью радиальных базисных функций можно прогнозировать значения выше максимальных и ниже минимальных исходных значений [230, 231].

Радиальные базисные функции используют для создания сглаженных поверхностей из большого количества расчетных данных. С помощью функции можно успешно создавать слабо изменяющиеся поверхности, например, поверхности рельефа, не имеющие четко выраженных орографических элементов [89]. Однако эти методы не подходят при значительной вертикальной расчленённости рельефа.

1.3. Обработка и представление моделей рельефа SRTM и AsterGDEM в ГИС

Как было отмечено ранее, существует немало цифровых моделей рельефа, полученных с использованием данных дистанционного зондирования Земли коммерческими и государственными предприятиями и фирмами, предоставляемые в пользование за вознаграждение или на безвозмездной основе. Каждая модель имеет свои собственные геометрические особенности и показатели точности [15, 63, 75, 111, 120, 123,

128, 138, 167, 194, 202, 208, 241]. Наиболее распространенными, часто используемыми в исследованиях, и размещенные в открытом доступе, сегодня являются модели: GTOPO30, SRTM-3, SRTM Void Filled, GMTED2010, ACE2, AsterGDEM. Наиболее часто в территориальных исследованиях применяются модели AsterGDEM и SRTM, например, для оценки местности в горных районах [141], выполнения геоморфологических исследований [161, 215], прогнозирования стихийных бедствий, решения гидрологических задач и изучения ледников [160, 212].

Чтобы повысить качественные характеристики ЦМР исследователи в основном стараются объединить или откорректировать данные матриц высот SRTM и AsterGDEM, в том числе, путем их соединения. Как отмечено многими исследователями, несмотря на то, что AsterGDEM имеет более высокое разрешение сетки [197], SRTM отображает рельеф лучше [130]. Обе матрицы имеют свои ошибки, происхождение которых Дженсон [155] обосновывал непосредственно методами сбора первичной информации и методологией обработки данных ДЗЗ. Их методы сбора данных отличается: SRTM использует интерферометрический метод, AsterGDEM использует фотограмметрический метод обработки изображений. И, как следствие, все исследователи отмечают необходимость разработки более качественных моделей рельефа.

1.3.1. Регулярные модели рельефа

Одним из типов отображения моделей рельефа является регулярная сеть высот – GRID. «Регулярная сеть высот представляет собой решётку с равными прямоугольниками или квадратами, где вершины этих фигур являются узлами сетки» [74, с. 19] (рис. 5).

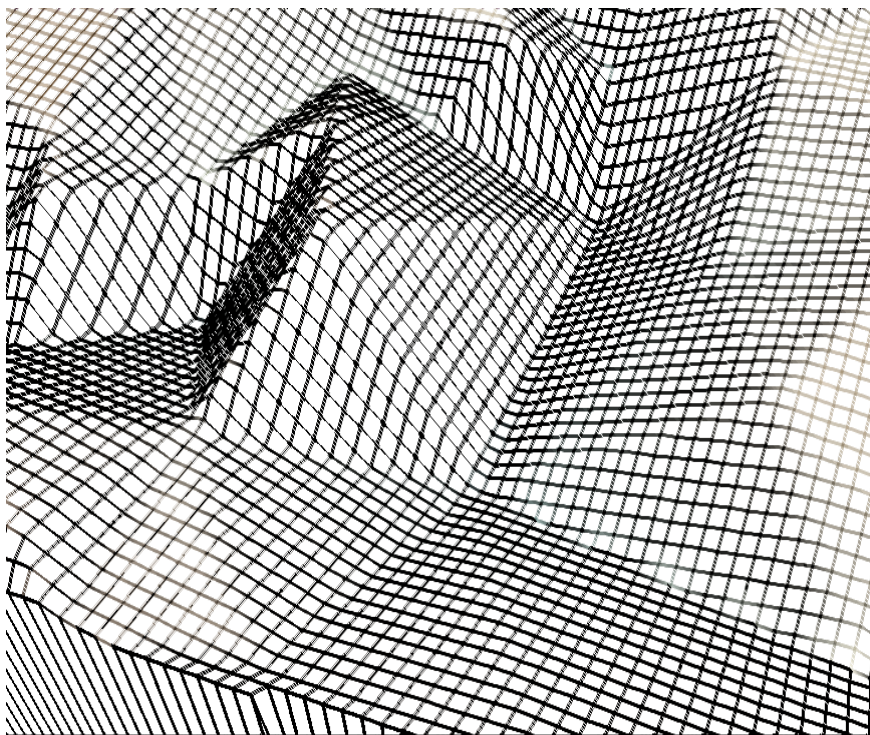


Рисунок 5. Фрагмент трёхмерной модели рельефа, построенной на основе регулярной квадратной высотной сети

При создании ЦМР на основе регулярных квадратных высотных сеток, необходимо учитывать их пространственное разрешение – значение неделимого элемента пространства и пользоваться правилом «Квадратного увеличения объёма»: увеличение разрядности регулярной сетки высот пропорционально квадрату занимаемого им пространства в памяти устройства хранения, т.е. разделение исходного элемента на 2 увеличивает объем занимаемого пространства в 4 раза, на 3 – в 9; на 4 – в 16 и т.д. [67, 250]. Кроме того, необходимо обращать внимание на характеристики локальных координатных привязок элементов сетки, т.е. какая часть пикселя имеет количественное описание (углы или центр).

«Путём интерполяции, аппроксимации, сглаживания и иных трансформаций к растровой модели могут быть приведены ЦМР всех типов» [74, с. 21]. В виде стандартизированных GRID представлены открытые матрицы высот SRTM и AsterGDEM (рис. 6).

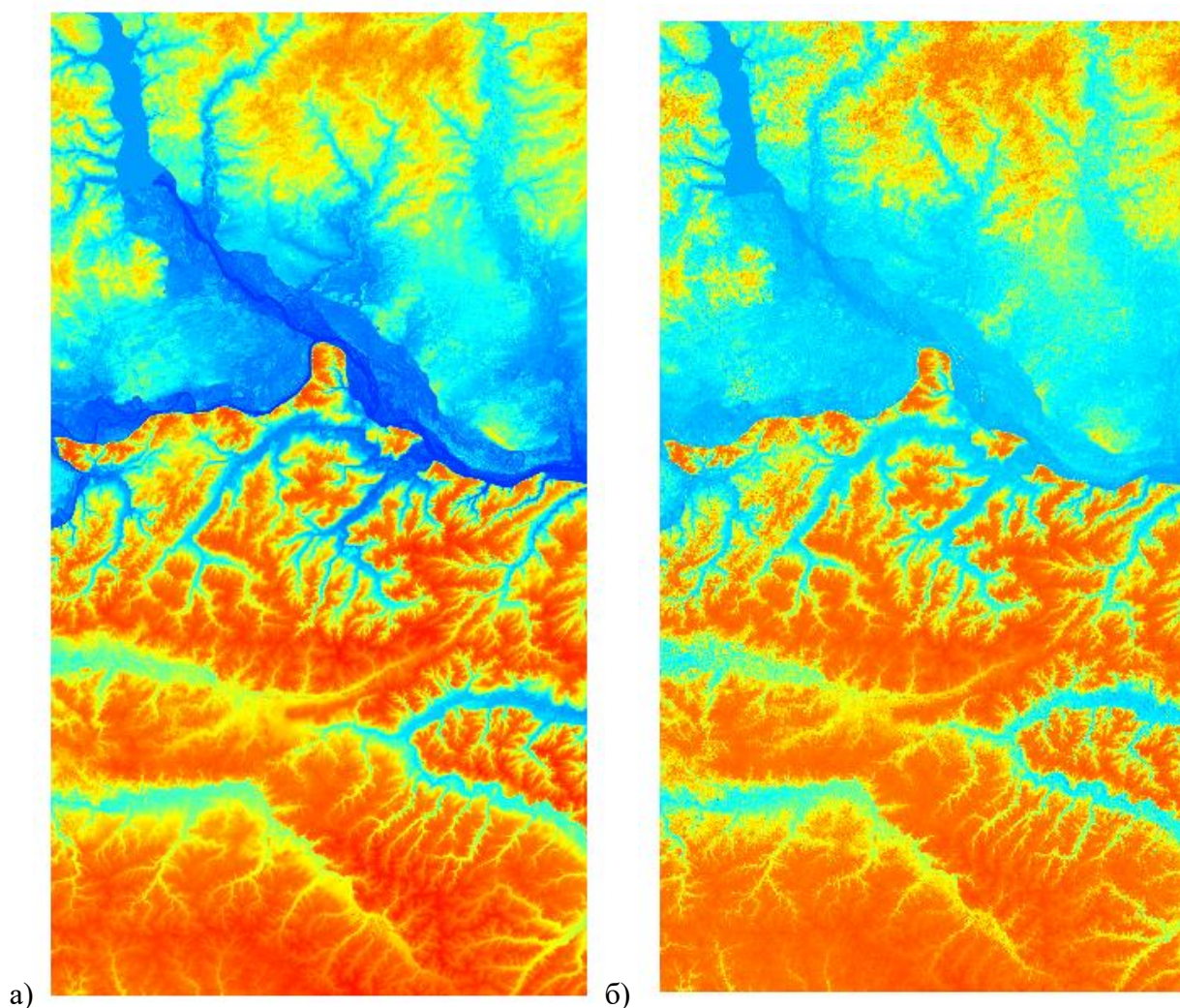


Рисунок 6. Фрагмент матрицы высот на основе регулярных квадратных высотных сеток на участок территории РФ между 55-57°с.ш. и 43-45 в.д.: а - Shuttle Radar Topography Mission, SRTM; б - Aster Global Digital Elevation Map, AsterGDEM v.2

Необходимо отметить, что именно GRID-модель является базовой моделью для построения динамических трёхмерных изображений, которые можно вращать, масштабировать, драпировать и т.д.

1.3.2. Нерегулярные модели рельефа

Вторым распространённым типом формирования моделей рельефа, является TIN (рис. 7). Особенность модели TIN в её наименовании – нерегулярная триангуляционная сеть (Triangular Irregular Networks). Такая модель представляет из себя решение линейной интерполяционной весовой задачи:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^3 P_i Z_i}{P} \quad (7)$$

где Z – искомое значение показателя высоты в точки, $\sum_{i=1}^3 P_i Z_i$ – сумма произведений площади и показателя высоты смежных («окружающих») фасетов, P – площадь треугольника описывающего смежные фасеты.

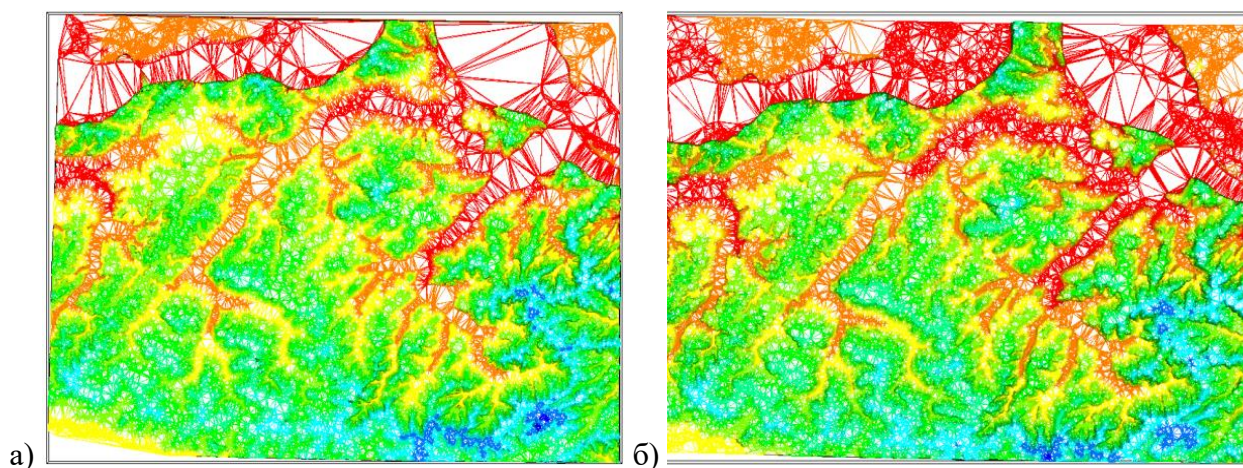


Рисунок 7. Триангуляции Делоне (TIN-структуры) на территорию бассейна р.Кудьмы: а – сеть фасетов построенная по данным топографических карт, б – сеть фасетов построенная по данным дистанционного зондирования Земли (SRTM) [30].

Данный способ максимально приближен к методу построения с использованием триангуляции Делоне с применением функции «fir» (преобразование неудовлетворяющих условию Делоне групп треугольников). Триангуляция называется триангуляцией Делоне, если она является выпуклой и удовлетворяет условию, при котором внутри окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, не попадает ни одна из заданных точек триангуляции [55, 73]. Данная триангуляция позволяет получить модель поверхности, составленную из треугольников, форма которых максимально приближена к правильной. Способом для улучшения параметров поверхности является введение в неё орографических линий, что является сложной задачей, т.к. сегодня не существует открытых продуктов, содержащих качественные орографические линии в полном объеме.

1.3.3. Модель AsterGDEM

С 17 октября 2011 года Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (the National Aeronautics and Space Administration of the United States, NASA) совместно с Министерством экономики, торговли и промышленности Японии

(The Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan, METI) разместили в открытом доступе результаты спутниковой радиолокационной съёмки Земли (Aster Global Digital Elevation Map, AsterGDEM) с пространственным разрешением 15×15 метров на всю территорию Земной поверхности в виде файлов в формате Geotiff [220]. Данная модель получена с использованием метода определения высот по стереопарам снимков с применением иерархического сопоставления областей, т.е. с применением фотограмметрических методов (рис. 8).

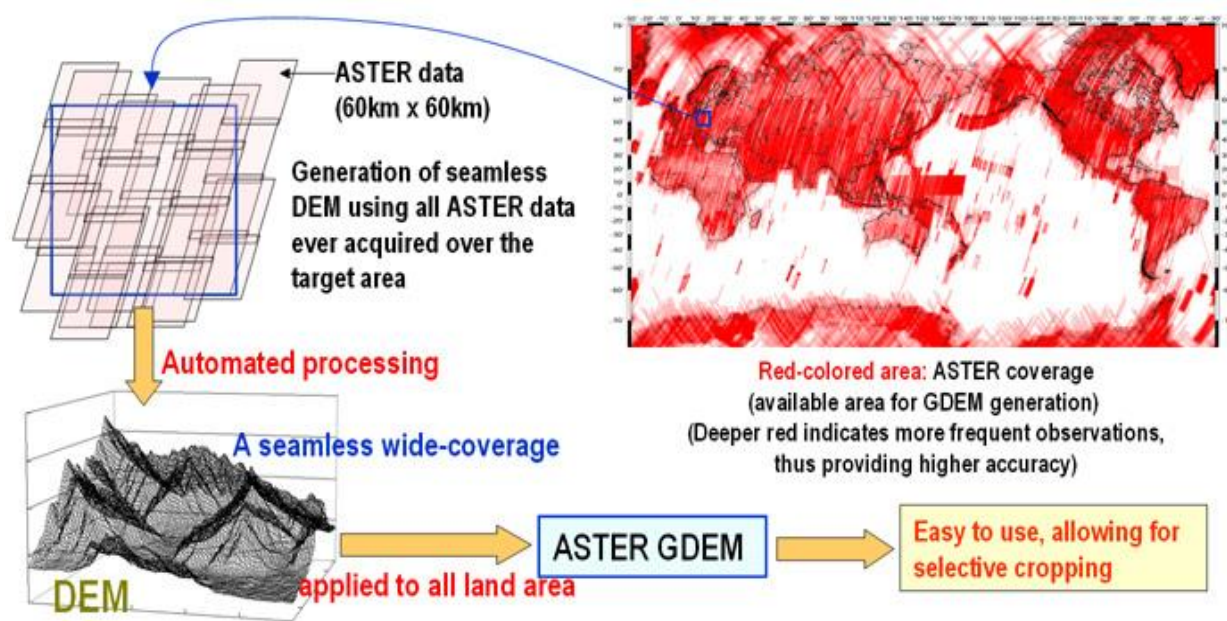


Рисунок 8. Получение модели ASTERGDEM GDEM [91]

Один кадр AsterGDEM в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне имеет размер 4,100 на 4,200 элементов, что соответствует 60×60 км на поверхности Земли. Для создания AsterGDEM использовалась автоматическая обработка всего архива данных AsterGDEM, насчитывающего 1.5 миллиона сцен [220]. Данные AsterGDEM бесплатны и доступны через геопорталы NASA Reverb [177] или Earth Explorer [116].

При загрузке данных требуется согласиться со следующими условиями: распространение AsterGDEM возможно только лицам внутри одной организации или работающим в области чрезвычайных ситуаций; при демонстрации или публикации данных AsterGDEM, необходимо включить ссылку «AsterGDEM is a product of METI and NASA»; материалы не могут быть распространены на коммерческой основе, а также быть использованы в качестве товара или услуги.

В открытом доступе AsterGDEM распространяется в формате GeoTIFF в географической системе координат (широта/долгота) с разрешением в 1 угловую секунду (примерно 30 метров). Система координат данных WGS84/EGM96. В таблице 1 сведены основные характеристики AsterGDEM. Оценка точности (не гарантированная) глобального продукта – 20 метров (95% доверительный интервал) для данных по вертикали и 30 метров (95% доверительный интервал) по горизонтали [128, 138].

Таблица 1 – Параметры AsterGDEM

Параметр	Значение
Размер фрагмента	3601 x 3601 (1°×1°)
Разрешение	0,5 угловая секунда (15 м)
Географические координаты	Широта, долгота
Выходной формат ЦМР	GeoTIFF, 16 бит с битом знака, система координат WGS84/EGM96
Специальные значения	-9999 для пробелов в данных, 0 для воды
Охват	83° с.ш. - 83° ю.ш., 22,702 фрагмента (Version 2)
Объем на диске	52 203 520 байт (около 52 мегабайт)

Спустя некоторое время, был осуществлен второй выпуск модели AsterGDEM v.2 благодаря накоплению и дальнейшему вовлечению в обработку 260 000 стереопар, что обеспечило улучшенное пространственное разрешение, повышенную горизонтальную и вертикальную точность [220]. Поставщик продукции так же предупреждает пользователя о возможных неточностях и артефактах в наборах данных: «Version 2 shows significant improvements over the previous release. However, users are advised that the data contain anomalies and artifacts that will impede effectiveness for use in certain applications. The data are provided «as is» and neither NASA nor METI/Japan Space Systems (J-spacesystems) will be responsible for any damages resulting from use of the data» [91].

1.3.4. Модель SRTM DEM

В 2003 году Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства (the National Aeronautics and Space Administration of the United States, NASA) опубликовало материалы спутниковой радиолокационной съёмки Земли (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) в виде цифровой модели рельефа (Digital elevation model, DEM). В открытом доступе были опубликованы матрицы высот с шагом 90 × 90

метров на всю территорию Земной поверхности в виде файлов ARC GRID, а также ARC ASCII [21, 136, 154, 200].

Существует три версии данных: предварительная (unfinished, версия 1), окончательная (finished, версия 2) и обработанная (SRTM NASA, версия 3). Окончательная версия прошла дополнительную обработку, выделение береговых линий и водных объектов, фильтрацию ошибочных значений (рис. 9).

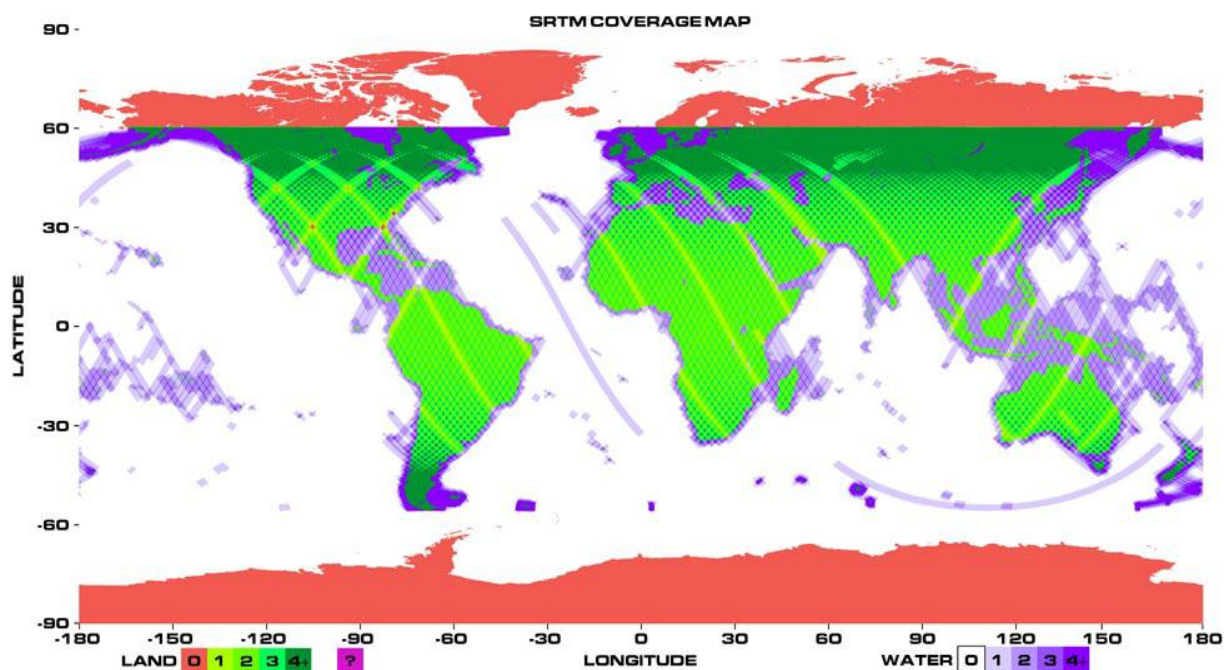


Рисунок 9. Схема покрытия территории Земли съёмкой SRTM [141]

Обработанная версия производится глобальным партнерством, объединяющем международные организации, занимающиеся исследованиями в области продовольственной безопасности (CGIAR), и представляет собой сборку мозаик в более крупные фрагменты (6000×6000 пикселей или 5×5, а не 1×1 градус) в которых и исправлены области с отсутствующими значениями [142].

Изначально планировалось распространение данных Level-2 с максимальным разрешением – 30 метров (1 угловая секунда), но, в связи с угрозой терроризма было принято решение распространять генерализированные данные Level-1 с разрешением 90 метров (3 угловых секунды) на всю отснятую территорию, кроме территории США, на которую данные распространяются с максимальным разрешением.

На некоторые территории в США (общей площадью 50 000 км²) съёмка вообще не производилась, что видимо также связано с вопросами национальной безопасности.

Разрешение данных по высоте кратно 1 метру. Все сырые данные (raw data) и данные с максимальным разрешением Level-2 распространяются только через Министерство Обороны США [195].

Таблица 2 – Параметры SRTM DEM

Параметр	Значение
Размер фрагмента	1201 x 1202 (1°×1°) <i>Один дополнительный ряд (нижний) и одна колонка (правая) являются дублирующим и повторяется на соседней матрице</i>
Разрешение	3 угловая секунда (90 м)
Географические координаты	Широта, долгота
Выходной формат ЦМР	GeoTIFF, 16 бит с битом знака, система координат WGS84/EGM96
Специальные значения	-32768 для пробелов в данных, 0 для воды
Охват	60° с.ш. - 54° ю.ш.
Объем на диске	891 776 байт (около 3 мегабайт)

1.4. Выводы по главе

В отличие от растровых картографических материалов, цифровые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обладают как преимуществами (не подвержены искажениям при проецировании, не имеют погрешностей сканирования, векторизации, временных задержек и т.д.), так и недостатками (величина случайных ошибок измерений много больше, чем при наземных съёмках, в силу чего особенности морфологии частных проявлений рельефа местности часто не отражаются в полной мере) [120, 123]. В связи с этим, на современном этапе, предъявляются повышенные требования к достоверности данных о рельефе местности, повышение их точности (исключение погрешностей) и сокращение времени достижения результата. Под достоверностью цифровых моделей рельефа понимается такое свойство информации, которое указывает на её точность, надёжность и соответствие реальности. Достоверность означает, что информация является правдивой и может быть проверена или подтверждена.

В научных исследованиях и практике часто используемыми являются модели рельефа SRTM и Aster. В части использования методов интерполяции, применяемых в отношении поверхностей рельефа, можно выделить основные: метод нерегулярной

триангуляционной сетки и метод обратных взвешенных расстояний. Оба метода имеют достоинства и недостатки, связанные, в основном, с исходными данными и плотностью их распределения. Таким образом, использование любого из методов интерполяции, при восстановлении значений ячеек сети, требует дополнительных коэффициентов, позволяющих усовершенствовать их и повысить точность. Также установлено, что основные ошибки в глобальных моделях рельефа связаны с плановым или высотным распределением (смещением), наличием остаточных признаков лесной растительности, и различными стохастическими всплесками, вызванными технологией получения данных дистанционного зондирования земли. Кроме того, следует отметить, что обе глобальные модели представляют собой генерализированные регулярные матрицы высот, которые не учитывают базовые орографические линии рельефа, а, следовательно, не отражают малые формы рельефа и не отвечают требованиям гидрологической корректности, в случае их использования в пределах частных водосборах. Указанные критерии и ошибки моделей требуют корректировки и совершенствования для дальнейшего применения при составлении и разработки гидрологических и гидродинамических моделей.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

2.1. Общие вопросы оценки точности

Существует закономерность: чем большим преобразованиям подвергаются исходные данные о состоянии рельефа (рис. 10), тем больший процент погрешностей будет содержать его модель и, тем менее достоверными будут, получаемы на его основе, морфометрические характеристики.

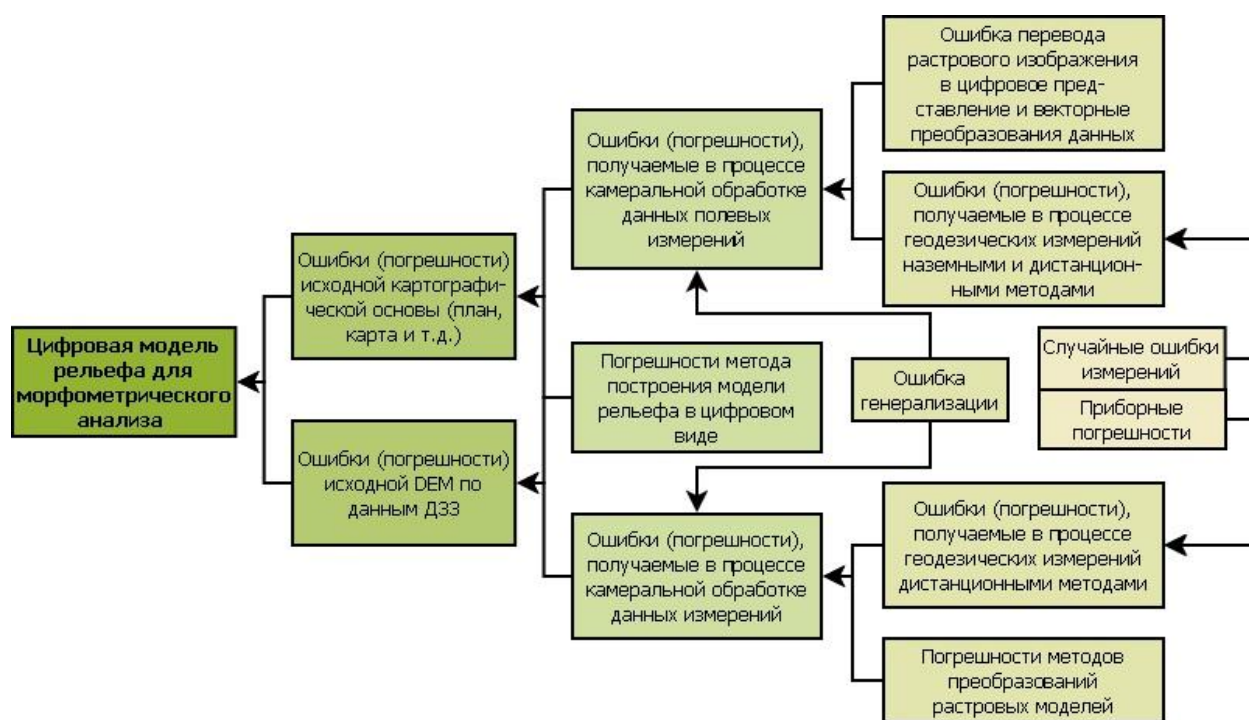


Рисунок 10. Схема укрупнённых групп источников погрешностей исходных данных, влияющих на результаты морфометрического анализа по созданной ЦМР

Количественно оценить качество любой модели возможно путем её анализа на предмет наличия и оценки погрешностей [82].

Погрешность – разность между измеренными и истинными величинами. В общем случае полная погрешность может быть разделена на систематические и случайные составляющие.

Систематическая погрешность – составляющая полной погрешности измерения, которая неизбежно повторяется во всём ряде измерений, закономерно изменяется и, учет которой, возможен без применения сложных алгоритмов и расчетов.

Случайная погрешность – составляющая полной погрешности, которая изменяется и распределяется в массиве данных случайным образом, учет которой полностью невозможен.

Характеризуются погрешности средним квадратическим отклонением:

$$\sigma_x = \sqrt{\mathbb{D}(\mathbb{X})} \quad (8)$$

Использование среднего квадратического отклонения при ограниченном объеме данных невозможно, однако, для целей статистической обработки результатов измерений «при бесконечно большом количестве анализируемых величин, математическое ожидание может быть заменено» на:

$$m_{n \rightarrow \infty} \rightarrow \sigma_x = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}} \quad (9)$$

где n – число измерений.

При отсутствии истинных (действительных) значений средняя квадратическая ошибка может быть определена по вероятнейшим поправкам (δ) и вычислена как:

$$m = \sqrt{\frac{[\delta^2]}{n-1}} \quad (10)$$

Для характеристики точности вероятнейшего значения измеренной величины, т.е. точность арифметического среднего, используется следующее соотношение:

$$M = \frac{m}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{[\delta^2]}{n(n-1)}} \quad (11)$$

Необходимо отметить, что средняя квадратическая ошибка (m) и средняя квадратическая ошибка среднего арифметического значения (M) не безошибочны, и их точность зависит от числа измерений:

$$m_m = \frac{m}{\sqrt{2(n-1)}} \quad (12)$$

$$M_M = \frac{m_m}{\sqrt{n}} = \frac{m}{\sqrt{2n(n-1)}} \quad (13)$$

Математическое ожидание, приравнивается к соответствующим теоретическим характеристикам называя их несмещённой оценкой и выявляет систематические погрешности наряду со случайными. Квадрат средней квадратической погрешности является состоятельной и несмещённой оценкой дисперсии [3].

Условия оценки точности (свойства погрешностей) [4]:

- Погрешность не может превосходить некоторого предела:

$$|\Delta_i| \leq \Delta_{\text{пред.}} \quad (14)$$

- Положительные погрешности встречаются примерно также часто, как и численно равные им отрицательные погрешности:

$$p_{(+x)} \cong p_{(-x)} \quad (15)$$

- Большие по абсолютной величине погрешности встречаются реже чем малые:

$$|\Delta_{\max}| \ll |\Delta_{\min}| \quad (16)$$

- При достаточно большом количестве данных, сумма погрешностей при делении на их число стремиться к «нулю»:

$$\frac{[\Delta]}{n} \cong 0 \quad (17)$$

Вероятностной моделью распределения случайной погрешности является их нормальное распределение [60]:

$$N(\delta, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (18)$$

Вероятностная модель, представленная в виде графика функции (рис. 11), своей конфигурацией, может показать качество анализируемых величин: чем больше выражены изгиб графика функции и симметрия, тем качественнее выполнены измерения.

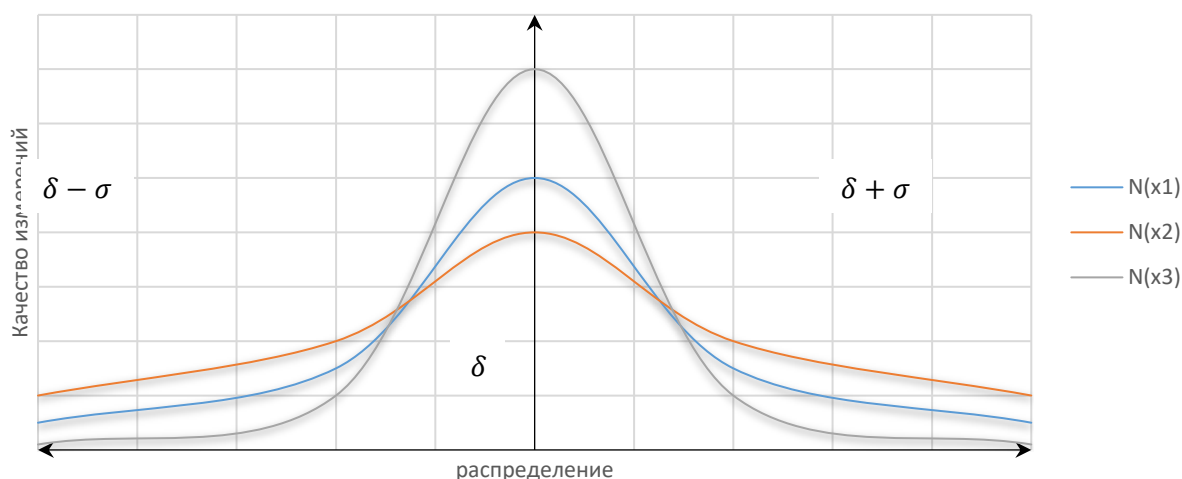


Рисунок 11. Примеры представления вероятностных моделей нормального распределения случайной погрешности

Отсутствие большой выборки значений является проблемой для области исследования распространения ошибок в модели рельефа. Некоторые авторы использовали практический подход, и просто сравнивали различные методы интерполяции [115, 232, 233]. Обычно предполагается, что распределение ошибок в модели ЦМР подчинено закону Гаусса и обладает сильной пространственной автокорреляцией [148, 149, 124, 125, 126, 187, 193], но, как отмечает Стэфен Вайс [235] – эти предположения в настоящее время основаны на очень малом количестве доказательств. Немногочисленные исследования, которые говорили о подчинении распределения ошибки нормальному распределению по закону Гаусса [126, 144], не были подтверждены в дальнейшем. В своих работах Бонин и Роуссиакс [102], Оксанен и Сарьякоски [188] отмечают что распределение ошибок ЦМР значительно отличается от нормального распределения Гаусса и имеет при этом погрешности по величине больше предельных и большое количество ошибок близких к «0».

Оценка точности ЦМР и сравнение точности методов интерполяции отражено в большом числе исследований. Например, Шутом [207] были проведены глубокие исследования различных методов интерполяции, используемых как при создании ЦМР, так и во время обработки данных ДЗЗ. Уолш и коллектив авторов [225] обнаружили, что общая ошибка ЦМР может быть минимизирована уже на этапе получения информации при ДЗЗ. Полидори, Хоровиц и Гаилланде [190] предложили использовать фракталы для имитации модели местности с целью повышения ее точности. Гао [132] проведен комплексный анализ влияния дискретизации на точность построения ЦМР с использованием контурной векторизации. Гарет Рис [199] описал некоторые теоретические и практические аспекты

оценки точности с использованием различных методов интерполяции, которые могут быть использованы для увеличения разрешения при восстановлении ЦМР. Винсент Шаплот с коллегами [107] исследовали оценку точности ЦМР при изменении масштабного ряда изображения модели, зависимость между типами рельефа и плотностью данных на основе различных методов интерполяции.

В 2009 году Хёхле [143], а затем в 2015 году Ванг [227] с участием коллектива авторов в своих исследованиях использовали при оценке точности моделей рельефа средние ошибки: общее среднее, медианное и m-оценку, основываясь на том, что m-оценки асимптотически нормально распределены. При этом, не обязательно чтобы модель рельефа была построена по регулярной сети или TIN. Для оценки и сопоставления характеристик различных методов интерполяции используется метод перекрестной проверки или кроссвалидации. Точность методов интерполяции определяется по величине средней ошибки (MEAN), средней абсолютной ошибки (MAE), средней квадратической ошибки (RMSE), максимальным (MAX) и минимальным (MIN) по абсолютной величине разностями выборки:

$$MEAN = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (H_{i,j} - \boxed{H_{i,j}}) \quad (19)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n |H_{i,j} - \boxed{H_{i,j}}| \quad (20)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (H_{i,j} - \boxed{H_{i,j}})^2} \quad (21)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (H_{i,j} - \boxed{H_{i,j}})^2}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (H_{i,j} - \overline{H_{i,j}})^2} \quad (22)$$

где $H_{i,j}$ – отметка точки, полученная после интерполяции, $\boxed{H_{i,j}}$ – контрольное (эталонное) значение отметки точки, $\overline{H_{i,j}}$ – среднее значение из выборки.

Как отмечал в своей работе Монкот [178], использование при качественной оценке вертикальной составляющей цифровой модели рельефа (RMSE), предполагает, что средняя ошибка будет равна нулю, о чем свидетельствуют и свойства ошибок, описанные ранее. В исследованиях Монкота [178], Вайса [232, 234] Фишера [126], также отмечается что такая мера оценки как RMSE тесно связана с характером рельефа и будет отличаться при исследованиях равнинного или горного рельефа. Кроме того, Вайс [236] а через несколько лет Флоринский [127] отмечали, что даже незначительные ошибки в высотной составляющей модели рельефа могут сильно повлиять на производные морфометрические характеристики.

Во многих исследованиях по определению качества методов интерполяции цифровых моделей рельефа используется, как правило, малое количество эталонных (контрольных) значений, что является недостаточным для объективного оценивания ситуации. Для разрешения этой задачи Стэфен Вайс [235] предложил подход, который состоит в том, чтобы разредить сеть точек с высотами в модели, т.е. понизить пространственное разрешение, а затем используя интерполяционный методы восстановить модель обратно и провести сравнение с первоначальной моделью. Таким образом, он получил в оценке достаточно большое количество контрольных точек, равномерно распределенных по всей оцениваемой поверхности.

Таким образом, можно отметить, что при оценке точности цифровых моделей рельефа сегодня используется два основных подхода:

- использование наборов точечных эталонных элементов, полученных с использованием картометрического метода или натурных геодезических измерений [126, 178] или полученных с использованием аэрофотосъемочных работ с использованием различных летательных аппаратов [113, 244], высоты которых определены с заведомо большей точностью;
- использование вспомогательных или производных поверхностей с математическим описанием [159, 247, 248].

Каждый из используемых подходов обладает своими преимуществами и недостатками. Стэфен Вай [235] предложил использовать оба подхода для оценки ЦМР и определения законов распределения ошибок.

2.2. Методы анализа качества матриц высот

2.2.1. Метод сравнения с использованием изолиний

Для сравнения трёхмерных цифровых моделей рельефа предлагается использовать средства нескольких программных ГИС продуктов: MapInfo Professional [172], Quantum GIS [192] и GRASS GIS [181] а также универсальную отечественную геоинформационную систему «Аксиома», предназначенную для подготовки, хранения, визуализации и анализа пространственных (картографических) данных. Основные функции и инструменты ГИС «Аксиома» реализованы аналогично ГИС MapInfo Professional, а полная совместимость форматов позволяет использовать одни и те же данные для работы в ГИС «Аксиома» и ГИС MapInfo Professional.

Для оптимизации данных и планового совмещения выбрана геодезическая система координат с соответствующей проекцией и эллипсоидом.

Информация о системе координат (как отдельно, так и в составе координатных систем) и параметрах эллипсоидов хранится в текстовом файле *.prj, в который добавлены различные референц-эллипсоиды и проекции. На рисунке 12 приведён состав строки, содержащей информацию по системам координат и параметрам эллипсоидов.

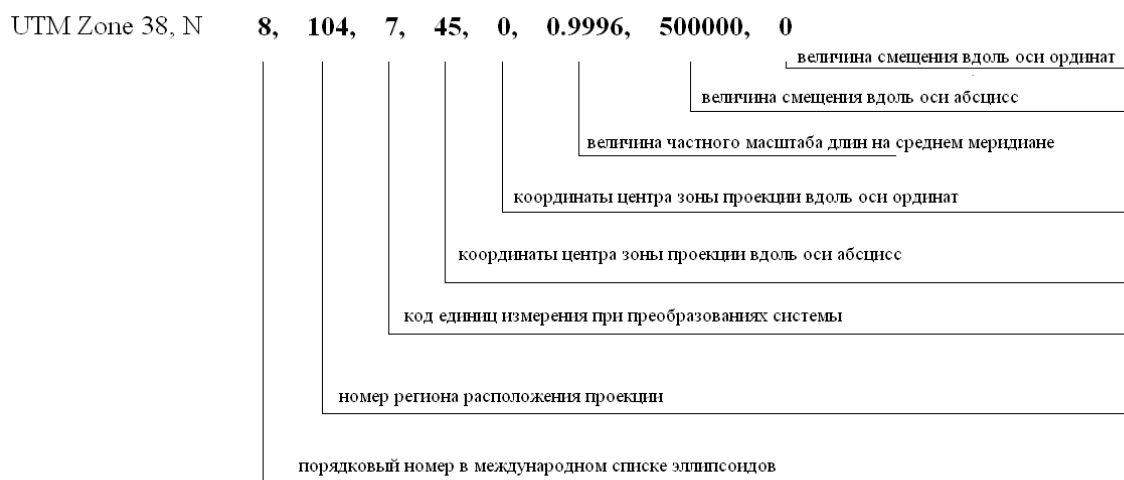


Рисунок 12. Схема хранения данных о СК и параметрах эллипсоидов по [21, с. 61-93], [68, с. 39-59], [172, с. 484-489]

Параметры использующихся в проекте систем координат приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры используемых систем координат

Название	Параметры
Долгота / Широта (WGS 84)	1, 104, 0, 0, 0, 0, 0, 0
GK Зона 8 (Пулково 1942)	8, 1001, 7, 45, 0, 1, 8500000, 0
UTM Зона 38, Северное полушарие (WGS 84)	8, 104, 7, 45, 0, 0.9996, 500000, 0
МСК-52 (Зона 2)	8, 1001, 7, 44.55, 0, 1, 2250000, -5714743.504
МСК-52 (Зона 2) Нижегородская область по ГОСТ 51794-2008	8, 9999, 3, 23.57, -140.95, -79.8, 0, -0.35, -0.79, -0.22, 0, 7, 44.55, 0, 1, 2250000, -5714743.504

Все параметры матриц также приведены по вертикальной составляющей к EGM96. В основе сравнения лежит использование данных о рельефе из государственных топографических карт и сопоставление их с регулярными сетками открытых моделей [50]. При этом предполагается использовать топографические карты масштаба 1:100 000 в связи с тем, что их «пространственное разрешение» будет находиться в пределах 0,55 точности масштаба, учитывая погрешности за счёт деформации бумаги при сканировании, ошибок привязки и трансформирования [21], и, соответственно иметь плановое значение в 55 м. Данные картографические произведений имеют наиболее близкие параметры математической основы, которая используется в открытых моделях AsterGDEM и SRTM.

В качестве примера использована территория, которая хорошо изучена и имеет большое разнообразие характерных элементов рельефа, частично имеет территории, покрытые древесной растительностью, и описывается следующими географическими координатами: 55°42'00" и 56°13'30" северной широты; 43°11'30" и 44°33'00" восточной долготы.

Анализ структуры исходных матриц высот усложняется тем, что векторизованный картографический материал представляет собой нерегулярную матрицу высот, а данные открытых моделей – это регулярная матрица. Качество аппроксимации поверхности с использованием нерегулярной триангуляционной модели обычно выше, чем в случае использования регулярной [11, 73]. Поэтому для преобразования и приведения к единому виду регулярная матрица высот должна быть преобразована в набор точек, представляющий собой нерегулярную сеть. Для этого был разработан подход, предполагающий использование нескольких программных продуктов (MapInfo Professional или ГИС «Аксиома» и Quantum GIS) и приложений к ним. Схема использования разработанного подхода и порядок действий приведены на рисунке 13.

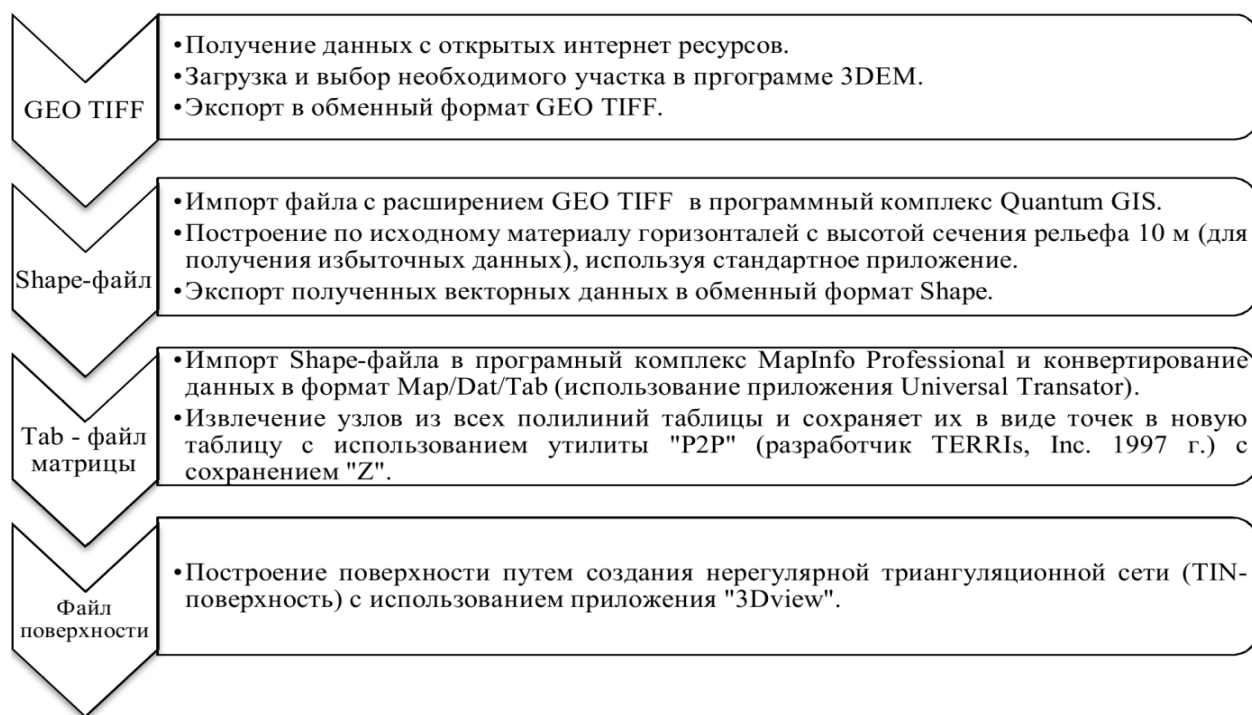


Рисунок 13. Схема последовательности преобразования матриц высот «регулярная – нерегулярная» и построение поверхности

С целью оптимизации результатов, все исходные данные каждой модели были приведены к минимальным средневзвешенным показателям (анализируемый высотный интервал находился в пределах от 80 м до 240 м, количество вершин, высота сечения рельефа, единая граница исследуемой территории).

Для построения модели рельефа по материалам цифровой картографической основы также используется способ аппроксимации поверхности нерегулярной триангуляционной сетью. Исходные данные для построения поверхности в этом случае формируются следующим образом:

- трансформирование цифровой (сканированные изображения) топографической основы и привязка в системе координат WGS-84;
- импорт в комплекс Easy Trace [118] и полуавтоматическая векторизация горизонталей с ручной корректурой;
- экспорт результатов в ГИС, перевод узлов полилиний (рис. 14) в точки и окончательное преобразование и доработка объектов с присвоением атрибута Z (высота).

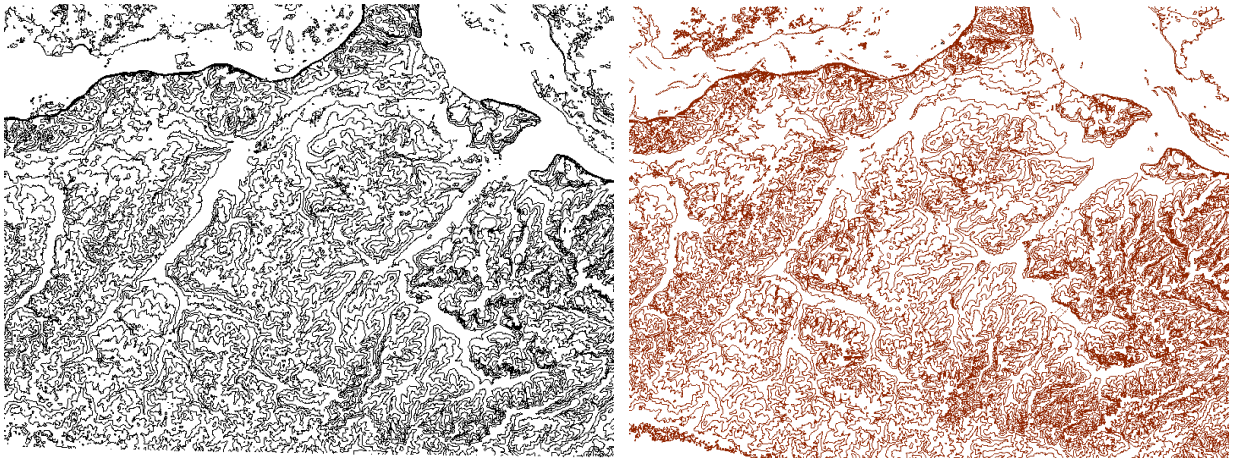


Рисунок 14. Рабочее окно ГИС с отображением рельефа в виде горизонталей по данным дистанционного зондирования Земли (левое) и материалам стереотопографических съёмок (правое)

С помощью программного приложения «3Dview» были рассчитаны и сохранены в STL-формате три ЦМР [114]. В таблице 4 приведены основные параметры полученных поверхностей.

Таблица 4 – Параметры цифровых моделей рельефа бассейна

Параметр	Исходный материал		
	Традиционные картографические материалы	SRTM	AsterGDEM
Количество вершин	232355	185953	406621
Число фасетов	464623	366631	813090
$Z_{\min}$ (м)	80		
$Z_{\max}$ (м)	240		
Разрешение (м)	200×200		
Число колонок	449	505	786
Число строк	339	343	593
Объем STL-файла, байт	23 231 234	18 331 634	40 654 595
Размер информации об одном фасете, байт	50		

Как видно из таблицы, по своим показателям, материал STRM близок к параметрам традиционных картографических материалов, отличие обусловлено, как говорилось ранее,

из-за пространственного разрешения обрабатываемого изображения. Количество вершин в модели также зависит от пространственного разрешения. Несмотря на результирующее значение разрешения, именно от качества входных данных зависит получаемое значение для сравнения. Стоит отметить, что для улучшения результатов анализа качества модели AsterGDEM стоит использовать картографический материал масштаба не 1:100 000, 1:50 000 и крупнее.

Отображение поверхностей в ГИС MapInfo и ГИС «Аксиома» (рис. 15) является классическим и подчиняется картографическим законам, однако основная структура поверхности (триангуляция) при этом не видна, для её отображения используется приложение «3Dview». Данное приложение позволяет визуализировать построенную TIN-модель из STL-файла с использованием цветной палитры RGB.

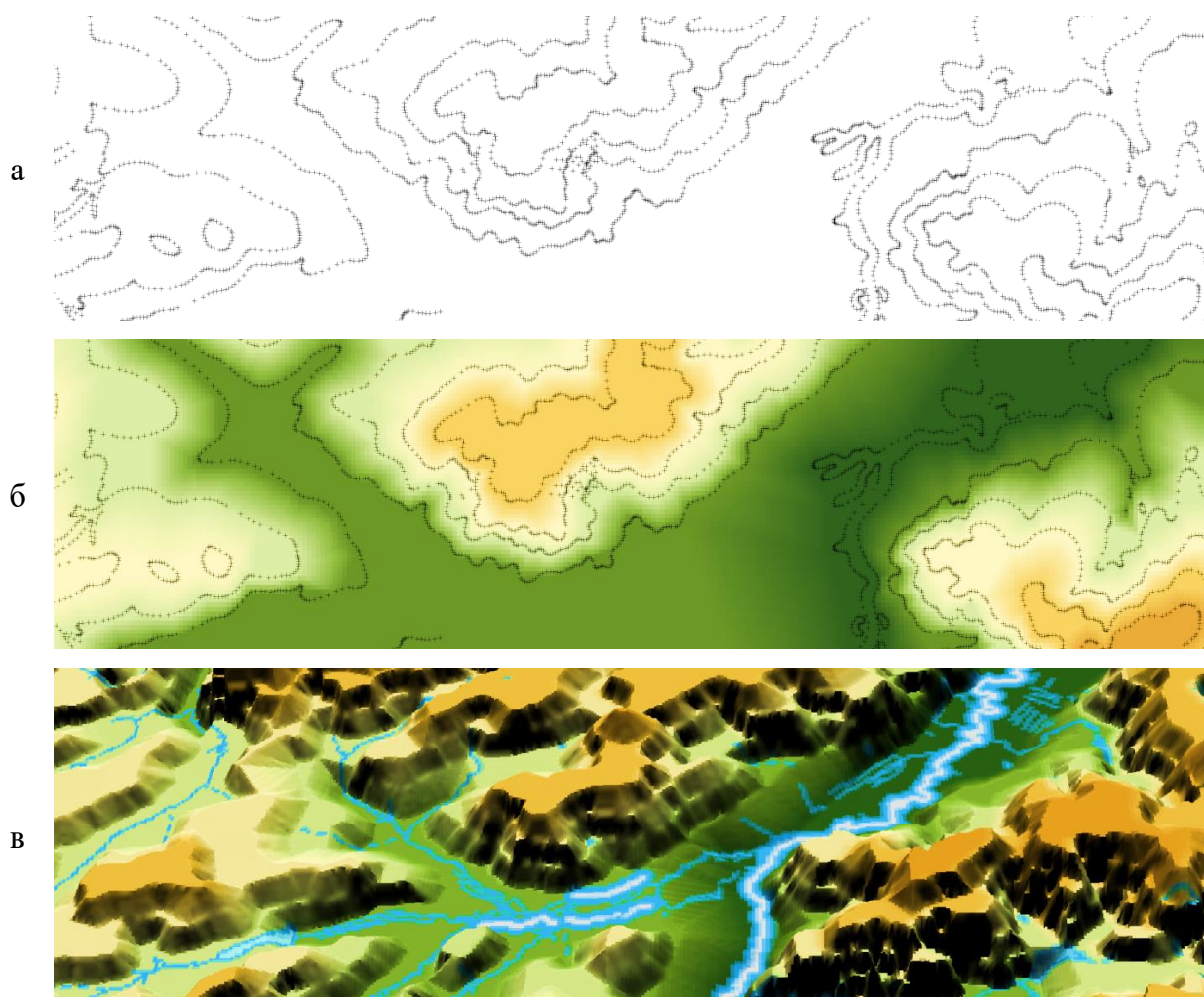


Рисунок 15. Простые варианты отображения поверхностей в ГИС: а – часть бассейна с исходными точками (вершинами) для построения триангуляции, б – вариант визуализации ЦМР с применением отмывки интервалов высот (20 метров), в – трёхмерная визуализация ЦМР части бассейна с увеличенным вертикальным масштабным коэффициентом

С целью проведения анализа качества цифровой топографической основы (DEM_{topo}) и данных ДЗЗ (DEM_{RSD}) была вычислена матрица разностей высот (DEM_{res}). Поверхность, полученная по данным цифровой топографической основы, была принята за условно эталонную, с которой производится сравнение:

$$DEM_{res} = DEM_{RSD} - DEM_{topo} \quad (23)$$

По полученным разностям матриц высот была построена результирующая поверхность (рис. 16).

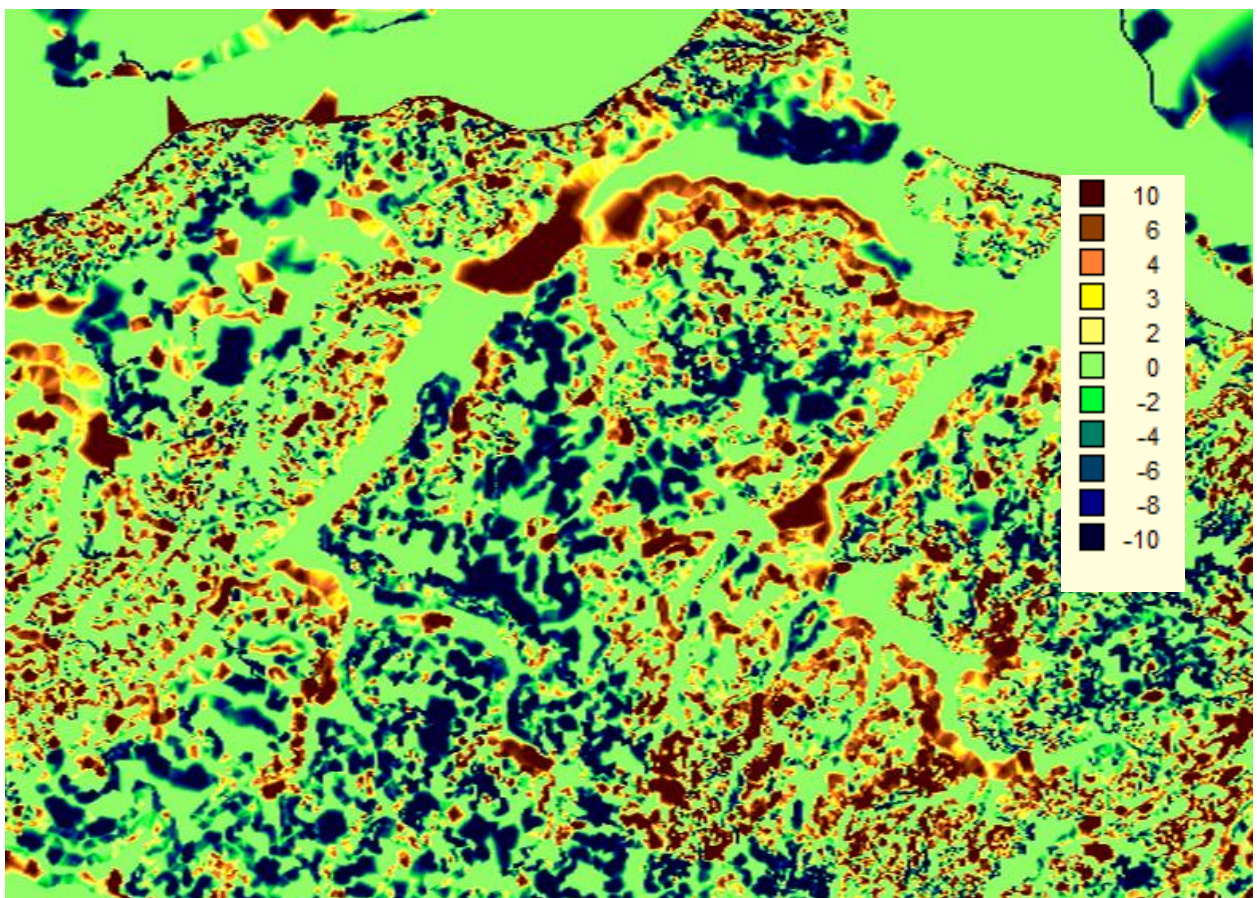


Рисунок 16. Разность отметок картографического материала и данных дистанционного зондирования Земли (на примере SRTM)

Полученные отклонения имеют два направления «+», «-» и находятся в пределах 20 метров. Положительные отклонения в основном расположены в понижениях рельефа, отрицательные – на приводораздельных возвышенностях (рис. 17). Максимальные по модулю значения располагаются в зонах, занятых лесными массивами.

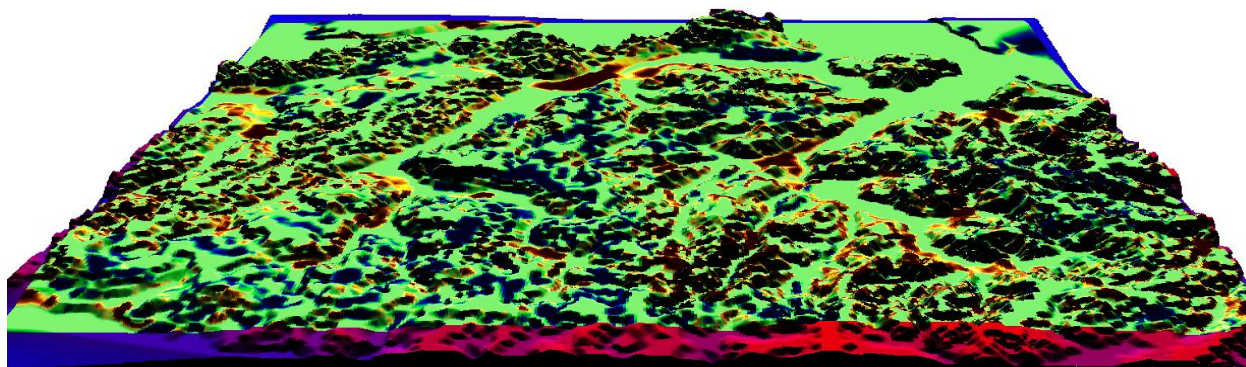


Рисунок 17. Трехмерная визуализация матрицы отклонений разностей отметок картографического материала и данных дистанционного зондирования Земли (на примере SRTM)

Полученные отклонения были разбиты на 5 метровые интервалы для вычисления процентного отклонения в каждом диапазоне по каждой из DEM (табл. 5).

Таблица 5 – Отклонение матриц высот цифровой топографической основы и данных дистанционного зондирования Земли

Интервал отклонений		% от общей площади территории	
		SRTM	AsterGDEM
более	-30	0,005	0,08
-30	-25	0,01	0,78
-25	-20	0,50	3,58
-20	-15	1,88	4,65
-15	-10	3,83	6,77
-10	-5	7,68	10,43
-5	0	16,78	21,35
0	+5	57,10	27,89
+5	+10	8,19	16,97
+10	+15	2,29	5,41
+15	+20	1,22	1,77
+20	+25	0,49	0,17
+25	+30	0,02	0,06
+30	более	0,005	0,09

На основе анализа данных топографических карт, полученных при проведении стереотопографических съёмок, и данных, полученных с использованием дистанционного зондирования Земли, точность формирования модели рельефа местности при заданном масштабе можно считать достаточной.

В исследовании использовался картографический материал масштаба 1:100 000 с заданной высотой сечения рельефа (h) и точностью определения высоты 4 метров ($1/3$ от h). Величина отклонений разностей поверхностей в пределах 4 метров соответствует чуть более 80 % от всей территории для SRTM и более 60% для AsterGDEM, при этом, в отклонениях обеих моделей имеется систематическая величина сдвига (рис. 18).

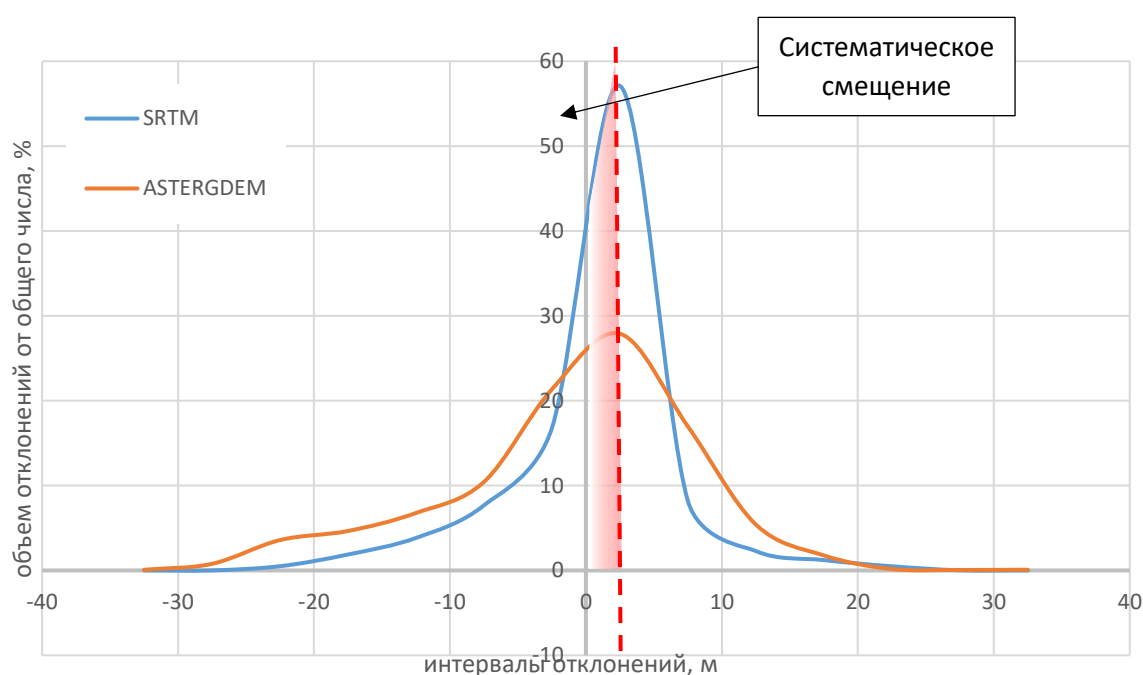


Рисунок 18. Диаграмма распределения отклонений матриц высот цифровой топографической основы и данных дистанционного зондирования Земли

Подобный метод, основанный на использовании вспомогательных или производных поверхностей с математическим описанием, встречается довольно редко в связи со сложностью и трудоемкостью получения исходных поверхностей, что также отмечено Джонсом [159], Жоу и Лю [247, 248]

2.2.2. Метод сравнения с использованием контрольных точек

Данный метод основан на том, что для оценки качества материалов за эталонные значения принимаются высоты пунктов государственной геодезической сети,

расположенные в пределах исследуемой территории, т.е. используется малая выборка эталонных значений. Этот метод наиболее часто используется и хорошо освещен в работах Монктона [178], Фишера [126], Зандбергена [244], Дэйвиса [113] и др.

Для сравнения качества высотных данных открытых моделей в опыте использовалась сеть пунктов с известными высотами (всего 86 пунктов), отметки которых (H_{GGS}) определены в эталонной системе высот (рис. 19).



Рисунок 19. Размещение сети пунктов ГГС на исследуемом участке бассейна

С использованием геоинформационной системы MapInfo, и приложения 3Dview, интерполяционным методом были определены отметки пунктов ГГС с поверхностями AsterGDEM (H_{AsGDEM}) и SRTM (H_{SRTM}). Затем были определены расхождения (h_A и h_S) вновь полученных отметок пунктов с известными высотами с интерполяционными:

$$h_A = H_{GGS} - H_{AsGDEM} \quad (24.1)$$

$$h_S = H_{GGS} - H_{SRTM} \quad (24.2)$$

По набору точек ГГС и полученным отклонениям были построены поверхности, соответствующие величинам отклонений по каждой из DEM с использованием метода IDW (рис. 20).

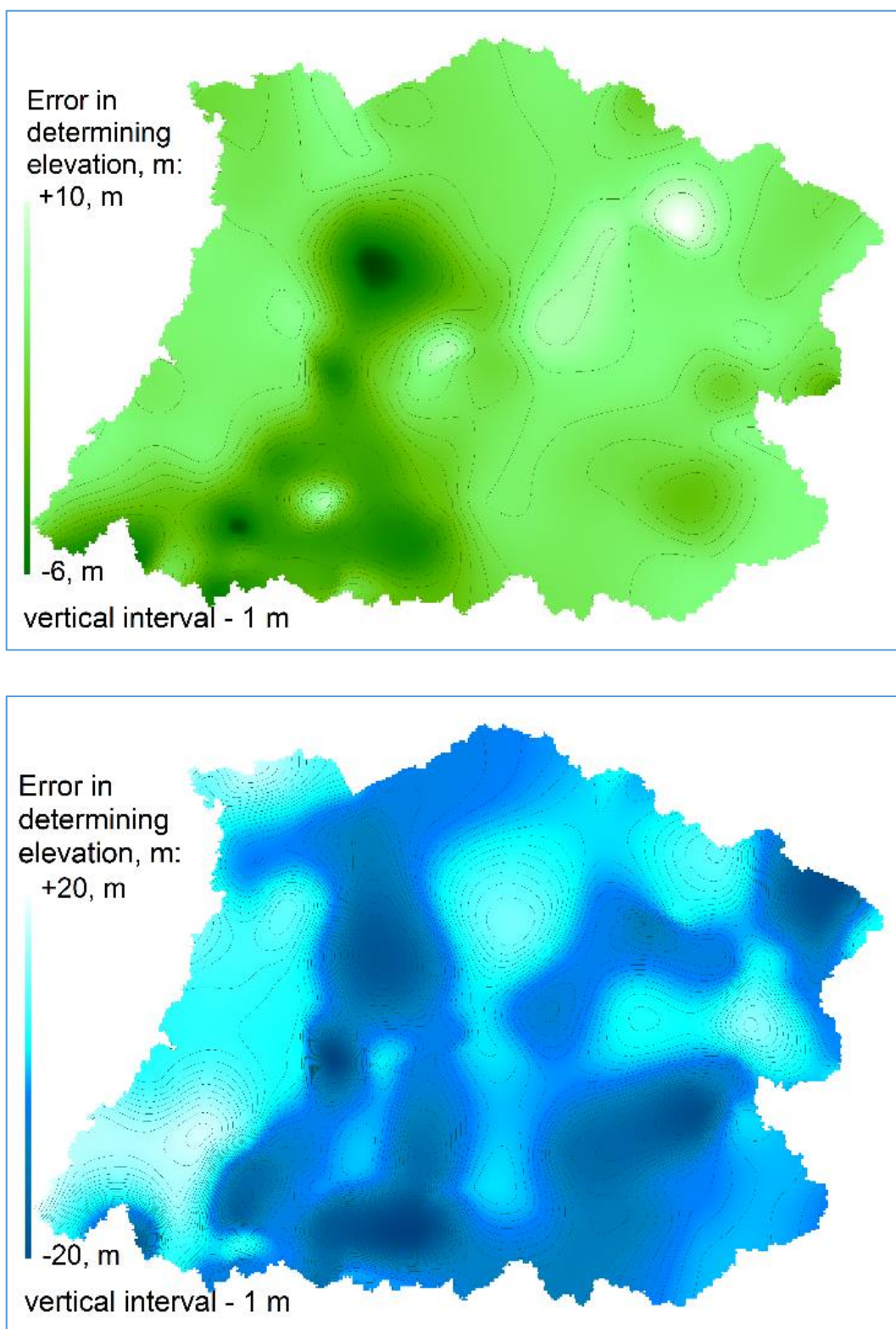


Рисунок 20. Поверхности отклонений отметок DEM (SRTM – верхнее и AsterGDEM – нижнее) от отметок пунктов ГГС

Анализ показал, что модель SRTM имеет отклонения от эталонных значений в пределах от -6 до +9 метров, при этом прослеживается зависимость положительных и отрицательных отклонений от покрытия территории древесно-кустарниковой растительностью, а именно: в лесных массивах расположен основной процент отрицательных отклонений, что свидетельствует о некачественной корректировке DEM за высоту древесного покрова, что также отмечается во многих исследованиях [30, 36, 79, 92, 96, 165, 210]. В то же время, на открытых участках местности DEM имеет положительные отклонения в 3-4 метра.

При сравнении AsterGDEM выявить закономерность искажений сложнее, т.к. имеется крупный разброс в значениях отклонений (от -16 до +21 м), однако, так же, как и в SRTM основной процент отрицательных отклонений расположен в пределах территорий, покрытых древесно-кустарниковой растительностью [202, 243], а положительных отклонений – в пределах открытых участков местности (табл. 6).

Таблица 6 – Процентная ведомость отклонений отметок DEM от отметок пунктов ГГС

Интервал, м	DEM, % от общей площади	
	SRTM	AsterGDEM
более -15	-	0,2
от -15 до -10	-	4,4
от -10 до -5	0,8	12,7
от -5 до 0	16,4	25,3
от 0 до +5	74,0	31,0
от +5 до +10	8,8	17,5
от +10 до +15	-	6,5
от +15 до +20	-	2,4
более +20	-	<0,1

Качество DEM можно оценить путём сравнения полученных результатов с нормативным значением средней квадратической погрешности определения высотного положения точки ($1/3h^c$) на топографической карте.

Из сравнения (рис. 21) видно, что, используя данные матрицы SRTM можно получить топографическую высотную модель рельефа местности с высотой сечения

рельефа от 10 до 20 метров (СКП от 3,3 до 6,7 м, что составляет более 90% всех данных). Ошибки AsterGDEM распределяются по закону Гаусса, в отличие от SRTM DEM – смещены в положительную зону. Несмотря на это данные AsterGDEM могут быть использованы только для составления цифровой модели рельефа в виде горизонталей с высотой сечения рельефа 20 метров и более.

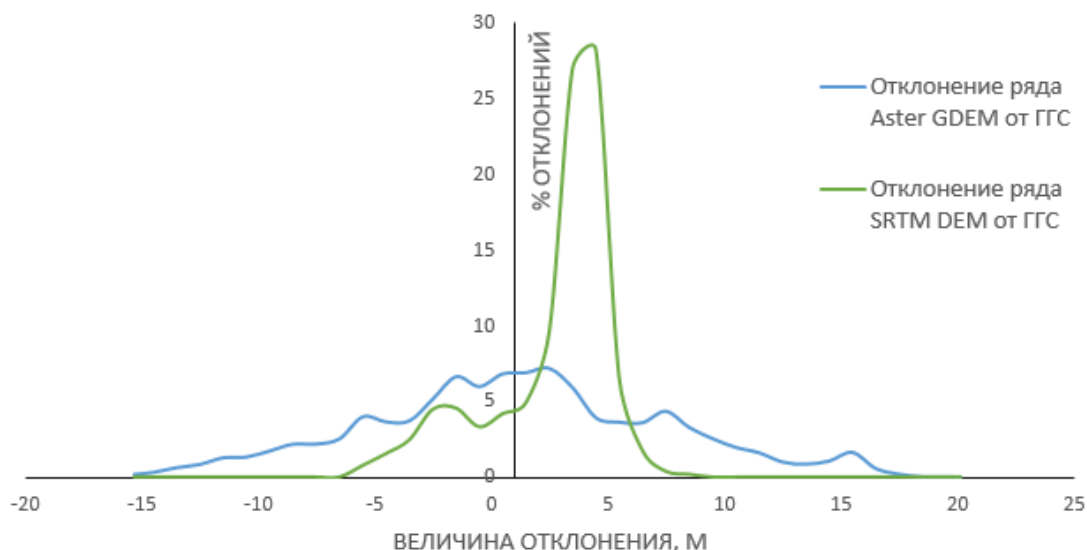


Рисунок 21. График суммы процента отклонений ряда отметок

Особенностью AsterGDEM является её высокое пространственное разрешение и не высокое качество привязки, о чём говорит распределение погрешностей по закону Гаусса относительно экспозиционных распределений склонов в бассейне. На рассмотренном участке, коэффициент вытянутости территории которого близок к 1.0, радиус кривизны Земли достаточно мал, а форма геоида не имеет резких перепадов и крупных отклонений.

Оба метода оценки, с использованием топографической поверхности и с применением выборочных точечных значений, дали одинаковые качественный и количественный результаты, несмотря на множественные геометрические и графические преобразования данных, что говорит об их взаимозаменяемости.

Использование пунктов ГГС для оценки, в случае изучения новой территории, является более простым по сравнению с применением топографической поверхности, т.к. он исключает этап дополнительных преобразований моделей из регулярной решетки в TIN и обратно. Таким образом, именно метод с использованием отдельной эталонной точечной выборки должен быть использован при оценке точности моделей.

На схеме (рис. 22) показано наложение матриц отклонений по каждой из DEM на карту лесистости бассейна.

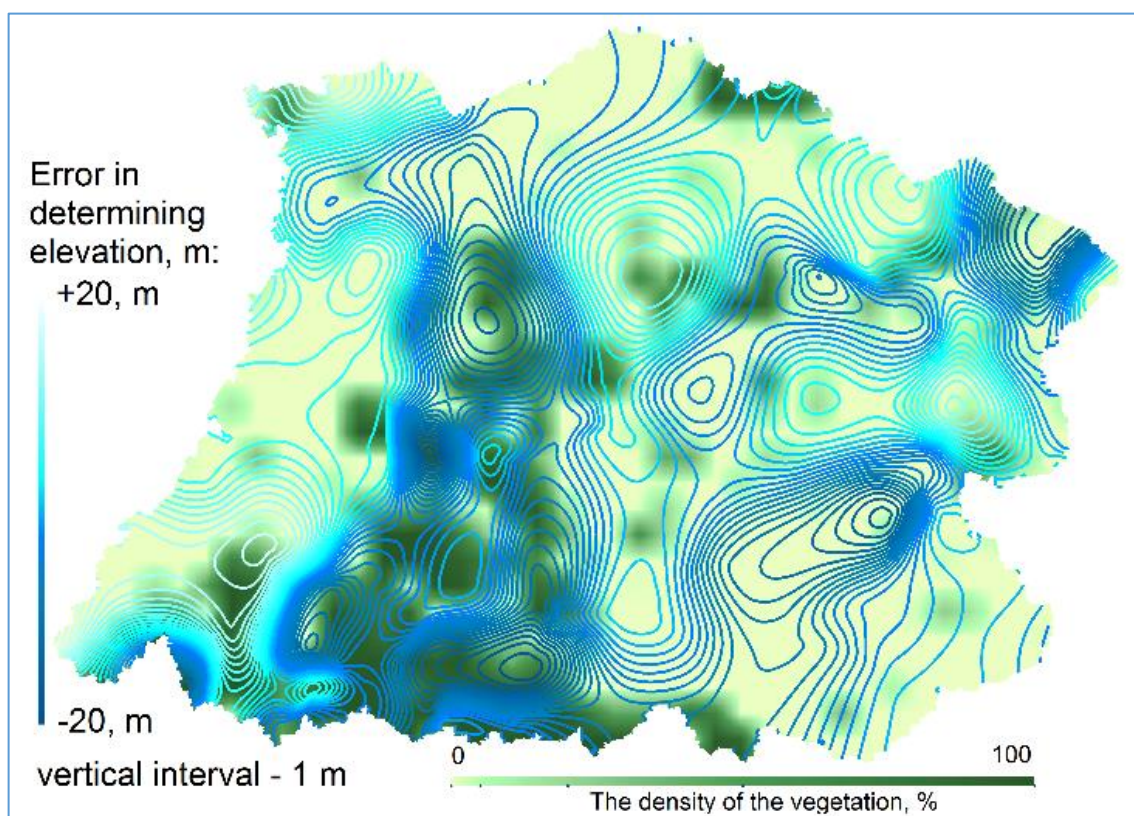
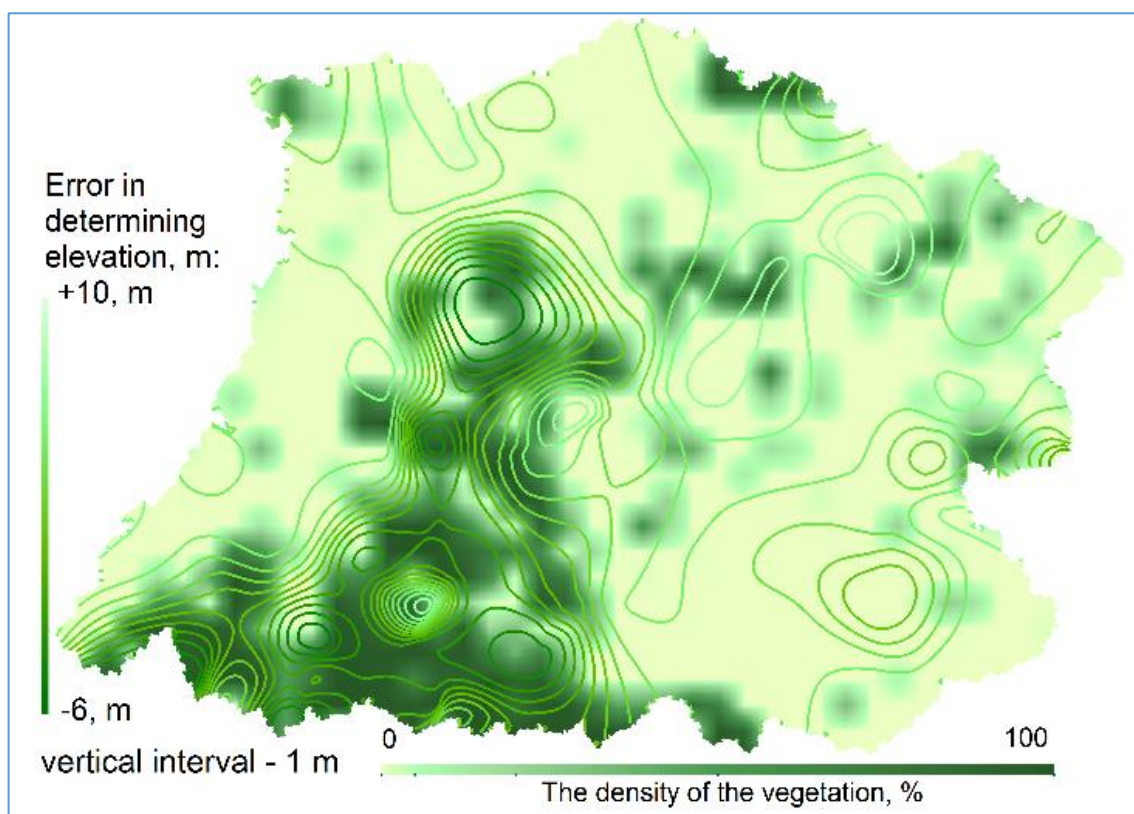


Рисунок 22. Совмещение карты лесистости бассейна и поверхностей отклонений (SRTM – верхнее и AsterGDEM – нижнее)

По ранее выполненным исследованиям автора [30, 44] и работам [81, 142, 167, 169], можно говорить о том, что характерными систематическими погрешностями цифровых

высотных моделей, полученных с использованием дистанционных методов зондирования Земли, являются: сдвиг, разворот и растяжение (рис. 23); случайными: шумы и приращение по высоте.

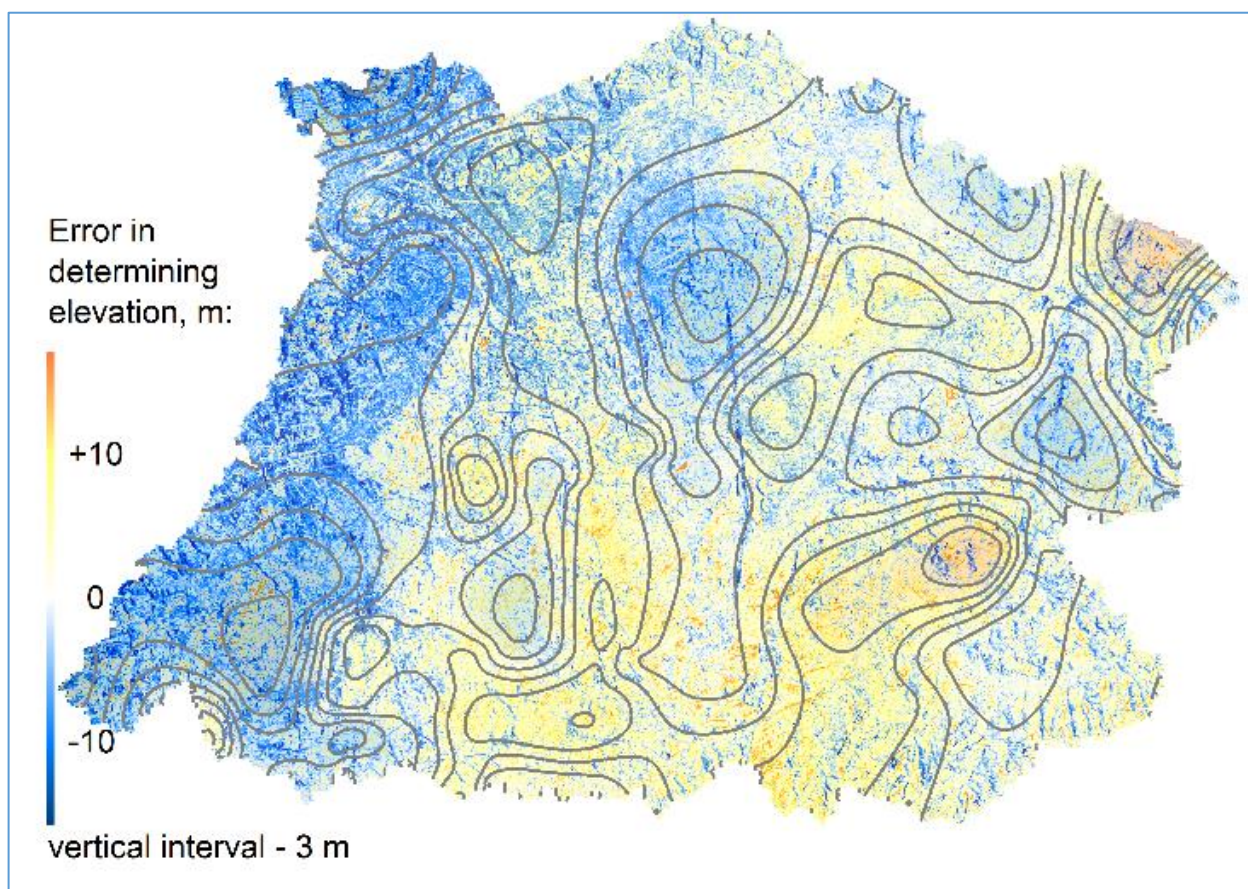


Рисунок 23. Калькуляция поверхностей «AsterGDEM-SRTM»

Систематические погрешности в моделях легко устраняются путём введения однородных поправок в каждую точку. Для исключения случайных ошибок предлагается два метода решения: корректура по поверхности отклонений из контрольных точек и корректура по элементам (с учётом растительного покрова). Оба метода решений предполагают использование дополнительных данных, получаемых также из открытых источников.

Учитывая наличие характерных систематических ошибок в зоне лесной растительности, для оценки качества открытых ЦМР, необходимо исключить эталонные пункты из участков занятых древесно-кустарниковой растительностью.

2.3. Методика оценки точности ЦМР

Учитывая вышесказанное следует отметить основное: проведение сплошной оценки точности ЦМР не является объективным в связи с различными качествами входных данных, которые можно классифицировать на две группы: участки, занятые лесными массивами и участки свободные от растительности. Обработку следует проводить с использованием в виде эталонных значений наборов данных о пунктах государственной геодезической сети, в т.ч. о пунктах плановых геодезических сетей с известными высотными отметками и о пунктах высотной геодезической сети. При вычислении характеристик точности, следует разделять показатели на оценку открытых территорий и оценку территорий, занятых древесной растительностью. Особенностью использования данных ГГС в оценке точности, является отсутствие этапа полевого сбора информации.

Процедура обработки данных, приведенная на рисунке 24, описывает процессы преобразования информации и извлечения данных о геометрических показателях объекта анализа на ограниченной территории. Результатом работ служат три набора данных для оценки точности: объединенный – RMSE (terGGS), в состав которого входят все контрольные точки; рельефный – RMSE (DEM), в состав которого входят контрольные точки, расположенные на открытых участках местности; лесной – RMSE(DTM), в состав которого входят контрольные точки, попадающие на участки, занятые лесной растительностью.

Получаемые в результате подготовки данных наборы численных характеристик могут использоваться для вычисления различных оценочных показателей, построения графиков модели распределения, построения математических поверхностей распределения знамений ошибок в пространстве изучаемой территории и т.д. с использованием средств ГИС.

На рисунке 25 приведен график распределения отклонений по классифицируемым показателям, откуда видно, как распределяются ошибки на участках занятых лесной растительностью и открытых территориях. При этом также видно, что при оценке всего участка ЦМР распределение близко к закону Гаусса.

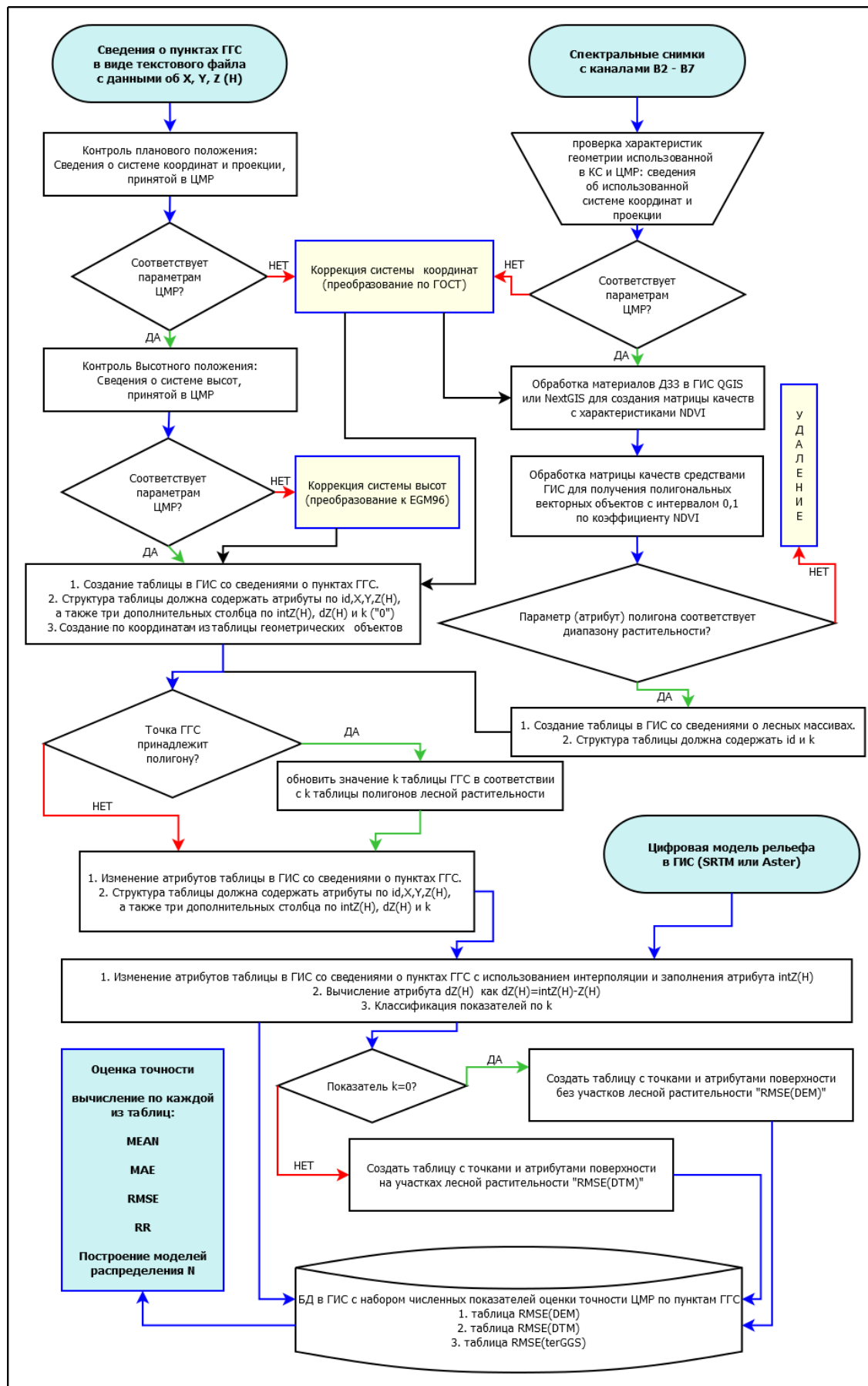


Рисунок 24. Процедура обработки данных при подготовке показателей для оценки точности ЦМР

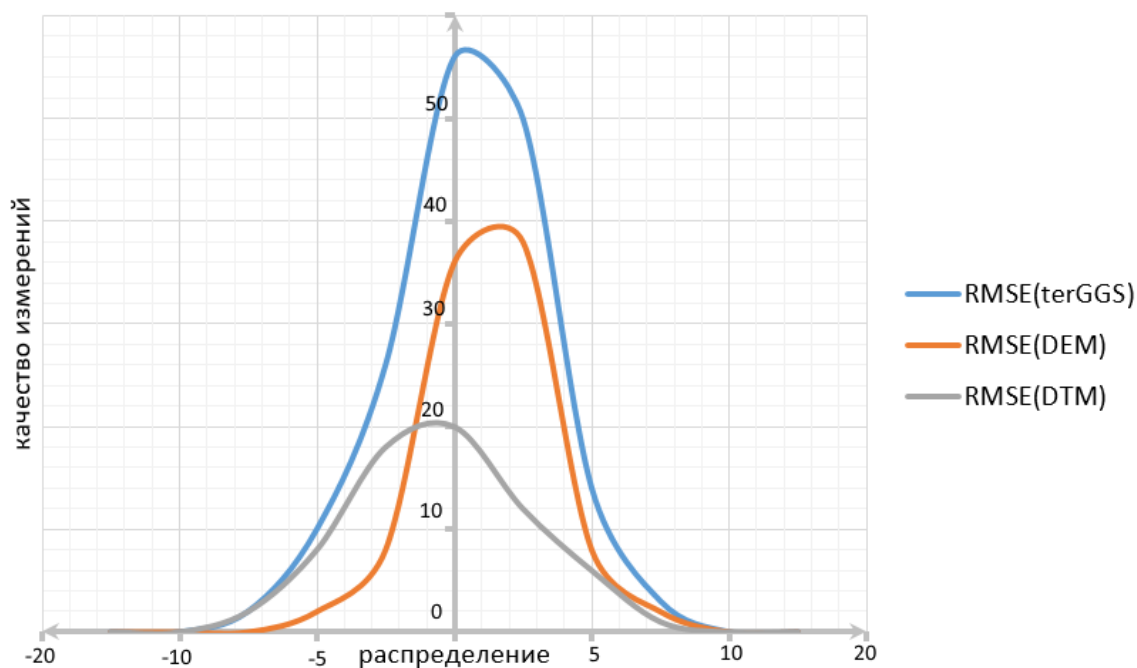


Рисунок 25. Вероятностная модель распределения погрешностей при оценке точности ЦМР по классифицированным участкам

2.4. Выводы по главе

При выполнении оценочных работ по вычислению точности геометрии поверхности, результирующие данные сильно зависят от количества эталонных значений, однако получаемые отклонения могут быть использованы в дальнейшем для целей корректировки моделей и последующем переформировании геометрии поверхности.

Оба метода оценки (анализа качества матриц высот), с использованием топографической поверхности и с применением выборочных точечных значений, дали одинаковый качественный и количественные результаты несмотря на множественные геометрические и графические преобразования данных, что говорит об их взаимозаменяемости.

По своим показателям, материал STRM близок к параметрам традиционных картографических материалов, отличие обусловлено, только из-за пространственного разрешения обрабатываемого изображения. Стоит отметить, что для улучшения результатов анализа качества модели AsterGDEM стоит использовать картографический материал масштаба не 1:100 000, а 1:50 000 и крупнее.

Использование контрольных пунктов для оценки, в случае изучения новой территории, является более простым по сравнению с применением топографической

поверхности, т.к. он исключает этап дополнительных преобразований моделей из регулярной решетки в TIN и обратно. Таким образом, именно метод с использованием отдельной эталонной точечной выборки должен быть использован при оценке точности моделей.

Предлагаемая процедура обработки данных, описывает процессы преобразования информации и извлечения данных о геометрических показателях объекта анализа на ограниченной территории. Результатом работ служат три набора данных для оценки точности: объединенный, состоящий из всех контрольных точек; рельефный, включающий контрольные точки, расположенные на открытых участках местности и лесной, в состав которого входят контрольные точки, попадающие на участки, занятые лесной растительностью. Проведение сплошной оценки точности ЦМР не является объективным в связи с различными качествами входных данных, которые можно классифицировать на две группы: участки, занятые лесными массивами и участки свободные от растительности. При вычислении характеристик точности, следует разделять показатели: на оценку открытых территорий и оценку территорий, занятых древесной растительностью. Особенностью использования данных ГГС в оценке точности, является отсутствие этапа полевого сбора информации.

ГЛАВА 3. КОРРЕКТУРА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА И ИХ ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА

3.1. Корректурa матриц высот по поверхности отклонений из контрольных точек

Главной особенностью методов корректировки является тот факт, что все исследователи стараются использовать максимально доступные технические средства и исходные материалы. Так, в своей работе Хуили и др. [147] был предложен метод гидравлической коррекции, основанный на использовании легкодоступных данных и автоматизированных алгоритмов обработки данных средствами ГИС.

Основная часть исследований в получении качественных характеристик ЦМР, выраженных численно в виде ошибки (обычно – СКП, RMSE), опираются на использование эталонных значений высот, в качестве которых предлагается использовать материалы натурных измерений спутниковым навигационным оборудованием или данных топографических планов или карт [101, 134, 136, 164]. После оценки точности обычно дается заключение о качестве модели, и, как следствие, численное выражение наиболее вероятной ошибки, которая будет содержаться в получаемых показателях. Некоторые исследователи [88, 200, 201, 239, 242] и научно-исследовательские учреждения готовили свои версии ЦМР из состава которых по их утверждениям исключены те или иные ошибки [97, 154, 200, 201, 239].

Таким образом, наибольший интерес представляют технологические разработки связанные с непосредственной оценкой точности моделей рельефа и их дальнейшей корректировки. Предлагаемая, и ранее описанная методика, оценки точности ЦМР, с дальнейшим восстановлением поверхности рельефа (рис. 26), позволяет не только провести оценку точности, но и, совместно с использованием метода восстановления значений скрытых поверхностей, откорректировать модель и визуализировать результаты, при этом для корректирующей поверхности отклонений предлагается использовать наиболее подходящий метод интерполяции.

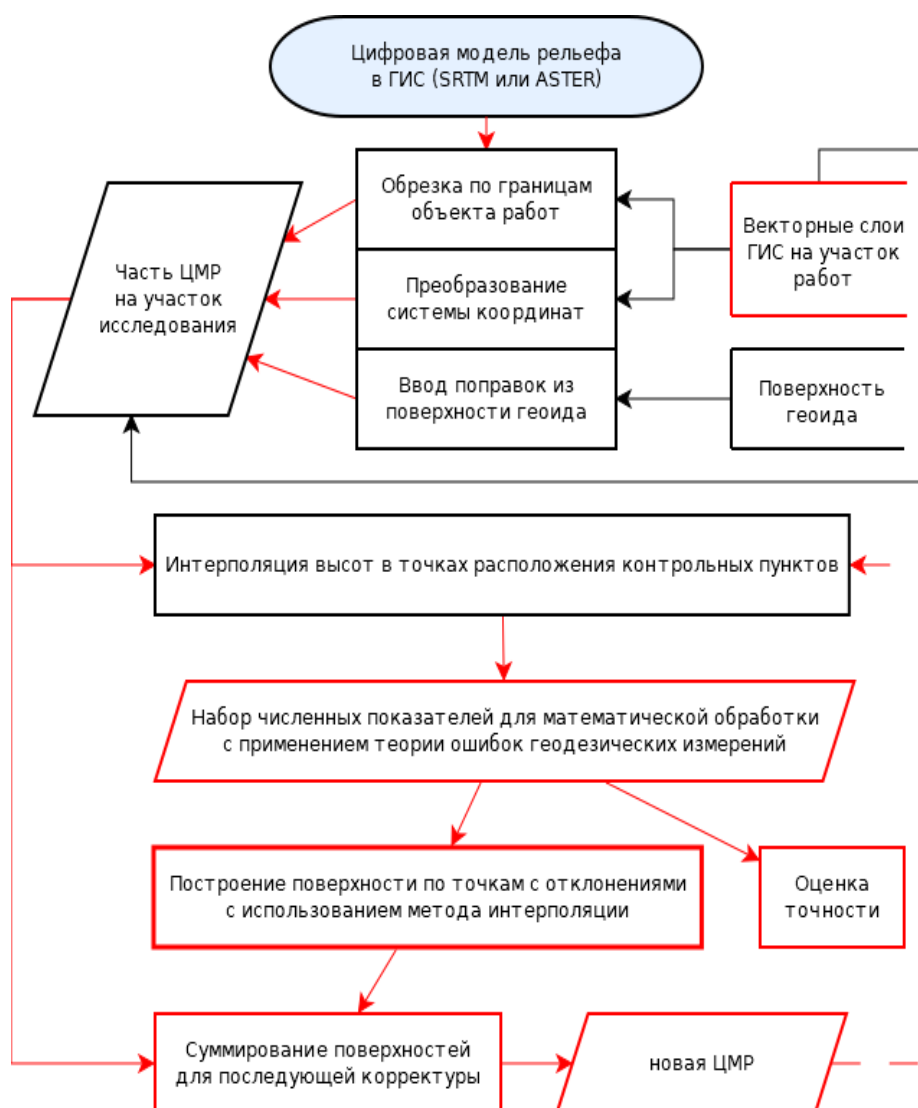


Рисунок 26. Схема оценки качества модели с дальнейшим восстановлением поверхности рельефа

Как отмечалось ранее, наиболее хорошие результаты по описанию модели рельефа получаются с использованием локальных интерполяционных методов. Растровые данные высот земной поверхности представляются в виде двумерной растровой матрицы, в которой каждый элемент несёт в себе определённую информацию. В простом случае каждая ячейка имеет одно определённое состояние или значение, в зависимости от дискретного или непрерывного пространства признаков. При этом местоположение, конфигурация и размеры исследуемых элементов земной поверхности, моделируются с учётом их взаимного расположения при схожих значениях или состояниях. Мозаичные модели в качестве составных частей могут включать в себя обобщённые и распределённые модели в качестве основных частей и при этом использовать любые из дифференциальных или матричных уравнений [94].

Для построения поверхности по отклонениям предлагается определить закон, которому подчиняется поверхность рельефа с максимальным подобием и приближением, т.е. определить математическую функцию, геометрическое отображение которой позволяло бы точно описать топографическую поверхность рельефа местности.

Коэффициенты матрицы предлагается определить методом интерполяции с применен интерполяционного полинома Лагранжа [53] необходимой степени (степень не выше 19). Расчет коэффициентов исходит из необходимого числа ячеек в матрице по каждому пикселю в отдельности:

$$P(H) = \sum_{i=0}^n H_k \frac{A(H)}{(x - H_k)A'(H_k)} \quad (25)$$

Предлагается использовать коэффициенты, только ограничивающие функцию при значении переменной «0» (Приложение Б).

Для экспериментального подтверждения были рассмотрены два участка территории в виде регулярной матрицы высот (SRTM и ASTER GDEM приведенные к БСВ-1977 с исключением участков лесной растительности с применением метода NDVI и метода корректуры с использованием буферных зон) – {DEM} – размером 200×200 (с 90 метровым разрешением) с общим количеством ячеек с известными отметками – 40000.

В процессе эксперимента каждая отметка последовательно вычислялась с использованием коэффициентов двух фильтров: нормальное гауссово распределение k_g и предлагаемое евклидово распределение k_e с использованием размерностей от 3×3 до 11×11 (все фильтры для простоты вычислений нормализовались таким образом, чтобы сумма участвующих в пересчете коэффициентов равнялась «1»). Затем по полученным моделям (DEM_{rsd}^g и DEM_{rsd}^e) определялись отклонения (ΔDEM_{rsd}^g и ΔDEM_{rsd}^e) относительно исходной поверхности DEM_{rsd} . Математически можно представить, как:

$$\begin{bmatrix} DEM_{rsd}^g = DEM_{rsd} \times k_g \\ DEM_{rsd}^e = DEM_{rsd} \times k_e \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta DEM_{rsd}^g = DEM_{rsd}^g - DEM_{rsd} \\ \Delta DEM_{rsd}^e = DEM_{rsd}^e - DEM_{rsd} \end{bmatrix} \quad (26)$$

В полученных матрицах поверхностей (ΔDEM_{rsd}^g и ΔDEM_{rsd}^e) проводилось взаимное сравнение отклонений и подсчет ячеек с тем или иным превышением для вычисления процентного соотношения качества перевычислений. Результаты приведены в таблице 7.

Затем по каждому из вариантов определения вычислялись средние квадратические погрешности с использованием формулы Гаусса:

$$MRSE(DEM_{rsd}^{g/e}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=40000} (DEM_{rsd}^{g/e} - DEM_{rsd})^2}{40000}} \quad (27)$$

Таблица 7 – Результаты экспериментальных вычислений на {DEM} – размером 200×200 (с 90 метровым разрешением) с общим количеством ячеек с известными отметками – 40000 (модели ASTER и SRTM – местность, покрытая лесной растительностью на 75%, модели ASTER+ и SRTM+ – местность, покрытая лесной растительностью на 25%)

Метод	Процент отклонений и СКП интерполирования					Тип поверхности
	3×3	5×5	7×7	9×9	11×11	
Круговое распределение с использованием только функции веса						
Нормальное распределение	77 (2,07)	82 (2,21)	87 (2,23)	87 (2,23)	87 (2,23)	ASTER (40000)
Евклидово распределение	23 (2,25)	18 (2,77)	13 (3,16)	13 (3,51)	13 (3,81)	
Нормальное распределение	83 (1,03)	84 (1,23)	84 (1,25)	86 (1,25)	88 (1,25)	SRTM (40000)
Евклидово распределение	17 (1,22)	16 (1,91)	16 (2,44)	14 (2,98)	12 (3,53)	
Нормальное распределение	73 (1,93)	74 (2,06)	75 (2,07)	76 (2,07)	76 (2,07)	ASTER+ (40000)
Евклидово распределение	27 (2,08)	26 (2,58)	25 (3,00)	24 (3,34)	24 (3,60)	
Нормальное распределение	77 (1,00)	81 (1,19)	84 (1,21)	85 (1,21)	86 (1,21)	SRTM+ (40000)
Евклидово распределение	23 (1,12)	19 (1,82)	16 (2,39)	15 (2,93)	14 (3,43)	
Круговое распределение с использованием коэффициентов Лагранжа и функции веса						
Нормальное распределение	73 (2,07)	62 (2,21)	67 (2,23)	67 (2,23)	67 (2,23)	ASTER (40000)
Евклидово распределение	27 (2,08)	38 (2,23)	33 (2,38)	33 (2,30)	33 (2,30)	
Нормальное распределение	77 (1,03)	64 (1,23)	72 (1,25)	73 (1,25)	72 (1,25)	SRTM (40000)
Евклидово распределение	23 (1,04)	36 (1,25)	28 (1,31)	27 (1,33)	28 (1,33)	
Нормальное распределение	71 (1,93)	66 (2,06)	66 (2,07)	66 (2,07)	66 (2,07)	ASTER+ (40000)
Евклидово распределение	29 (1,93)	34 (2,07)	34 (2,11)	34 (2,13)	34 (2,12)	
Нормальное распределение	65 (1,00)	66 (1,19)	71 (1,21)	71 (1,21)	71 (1,21)	SRTM+ (40000)
Евклидово распределение	35 (1,02)	34 (1,21)	29 (1,25)	29 (1,25)	29 (1,25)	
Диагональное распределение с использованием коэффициентов Лагранжа и функции веса						
Нормальное распределение	29 (2,07)	34 (2,21)	56 (2,23)	59 (2,23)	59 (2,23)	ASTER (40000)
Евклидово распределение	71 (2,04)	66 (2,19)	44 (2,24)	41 (2,26)	41 (2,26)	

Метод	Процент отклонений и СКП интерполирования					Тип поверхности
	3×3	5×5	7×7	9×9	11×11	
Нормальное распределение	27 (1,01)	36 (1,23)	65 (1,25)	67 (1,25)	68 (1,25)	SRTM (40000)
Евклидово распределение	73 (1,00)	64 (1,21)	35 (1,28)	33 (1,29)	32 (1,30)	
Нормальное распределение	30 (1,93)	34 (2,06)	54 (2,07)	57 (2,07)	58 (2,07)	ASTER+ (40000)
Евклидово распределение	70 (1,91)	66 (2,04)	46 (2,08)	43 (2,09)	42 (2,09)	
Нормальное распределение	31 (1,00)	37 (1,19)	51 (1,21)	52 (1,21)	57 (1,21)	SRTM+ (40000)
Евклидово распределение	69 (0,92)	63 (1,07)	49 (1,23)	48 (1,23)	43 (1,23)	

Результатом эксперимента стало подтверждение первоначальных предположений, что предлагаемый метод корректуры с использованием коэффициентов Лагранжа при малом объеме данных дает результат лучше, чем распределение Гаусса.

Ниже, на рисунке 27 приведен пример вычисления поверхности рельефа, при наличии нескольких ячеек с артефактами и сравнение предлагаемого метода с существующим алгоритмом интерполяции – IDW.

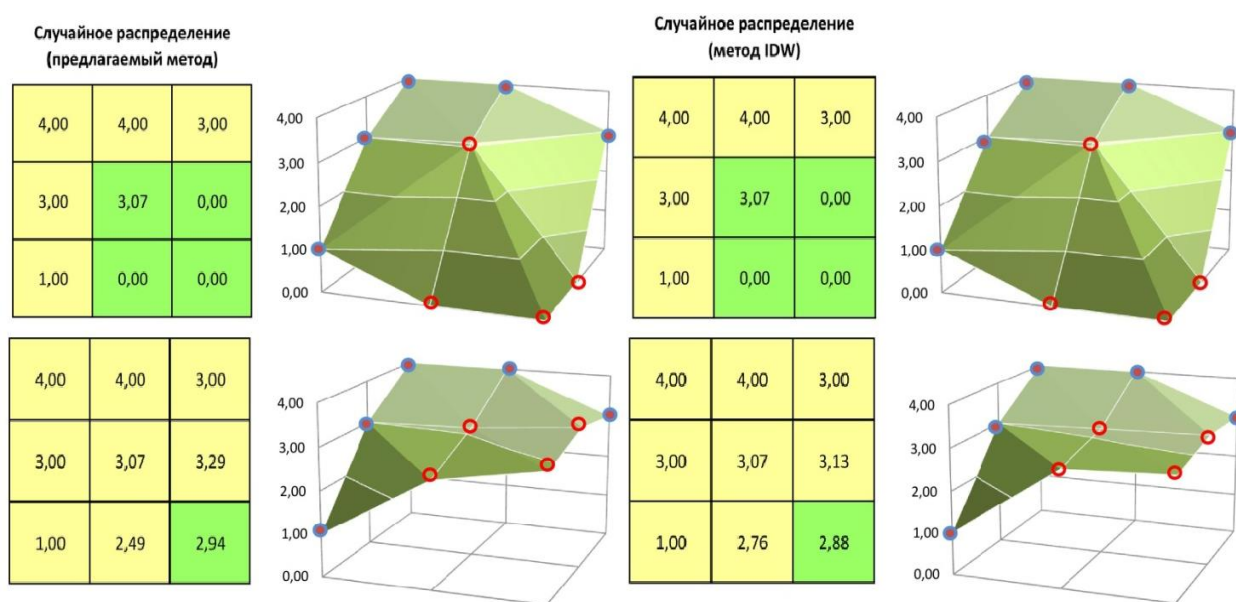


Рисунок 27. Сравнение предлагаемого метода интерполяции и существующего IDW

Для приведения имеющихся матриц высот к Балтийской систем высот (БС-1977) в данном методе, предлагается суммирование каждой DEM со своей матрицей отклонений полученной при оценке точности. После чего полученные матрицы необходимо проверить на качество, по принципу, описанному выше. Результат такой последовательности,

представляющий собой новые качественные матрицы, которые приведены на рисунках 28.а и 28.б.

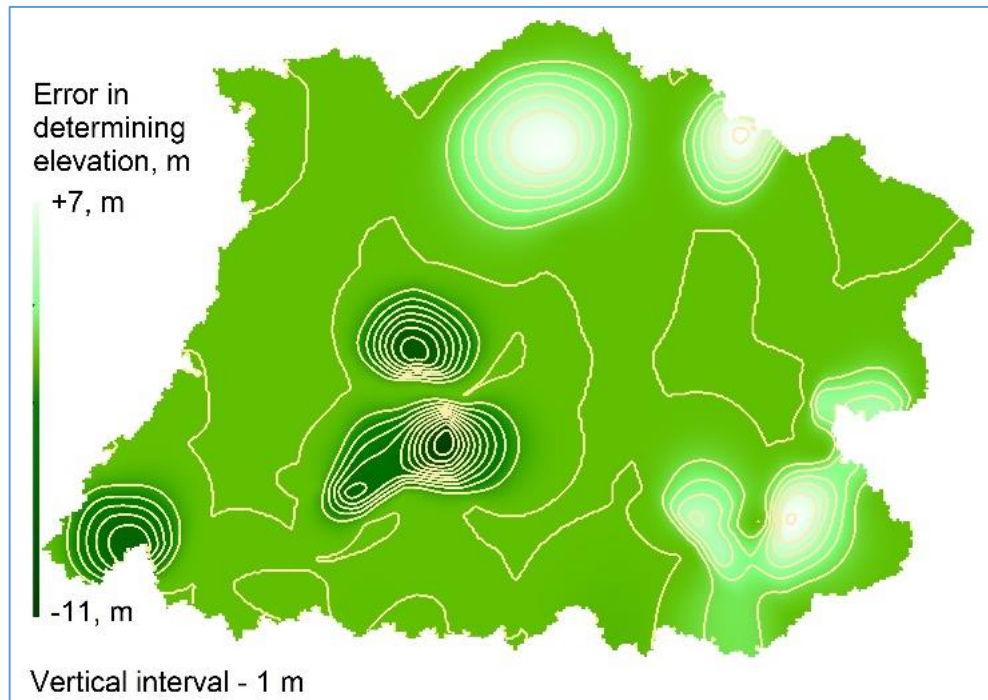


Рисунок 28.а. Поверхности отклонений отметок SRTM от отметок пунктов ГТС [36]

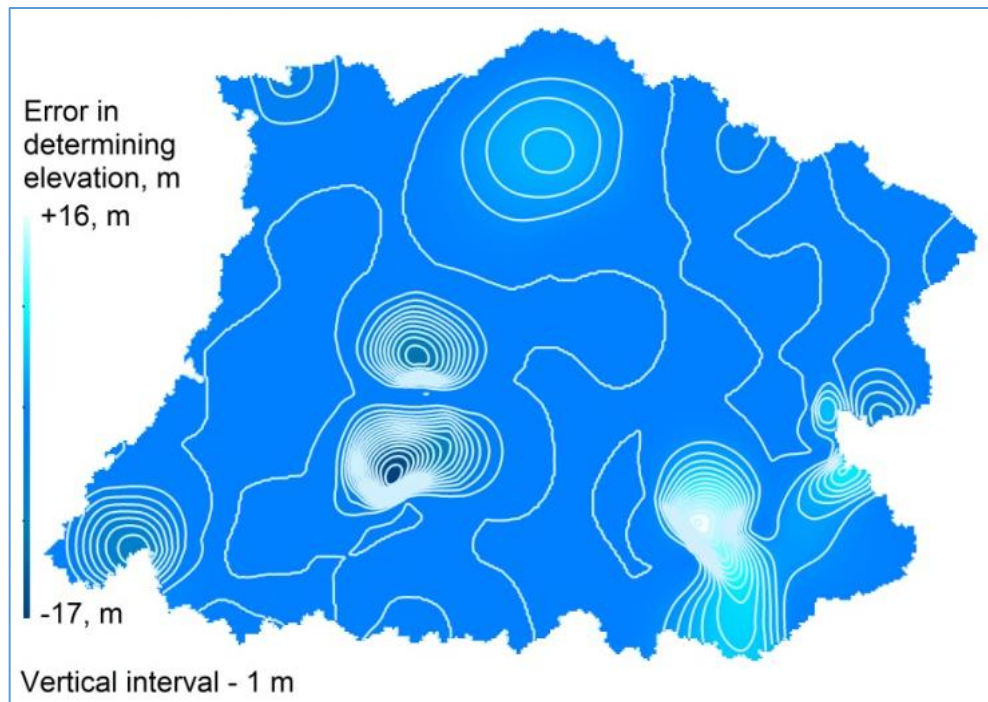


Рисунок 28. Поверхности отклонений отметок Aster GDEM от отметок пунктов ГТС [36]

После проведения корректуры, вновь проводится оценка точности показателей с использованием не входящих ранее в оценку эталонных точек (пунктов ГТС).

В сравнении с первоначальным («сырым») вариантом откорректированные поверхности имеют более высокую степень точности и основной объем отклонений (около 90 %) уже разбросан в пределах ± 3 м (табл. 8).

Таблица 8 – Процентная ведомость отклонений отметок DEM от отметок пунктов ГГС

Интервал отклонений, м		DEM, % от общей площади	
		SRTM	Aster GDEM
более	–16	–	<0,1
–16	–10	<0,1	0,8
–10	–4	3,1	3,4
–4	0	38,5	43,4
0	+4	54,5	48,8
+4	+10	3,3	2,5
более	+100	–	0,6

Используя данные новых DEM, можно получить топографическую высотную модель рельефа местности с высотой сечения рельефа в 5 метров (СКП 1,7 м, что составляет более 85 % всех данных SRTM и Aster GDEM).

По данным таблицы 8 был построен график (рис. 29) разброса суммарного процента отклонений новых рядов отметок.

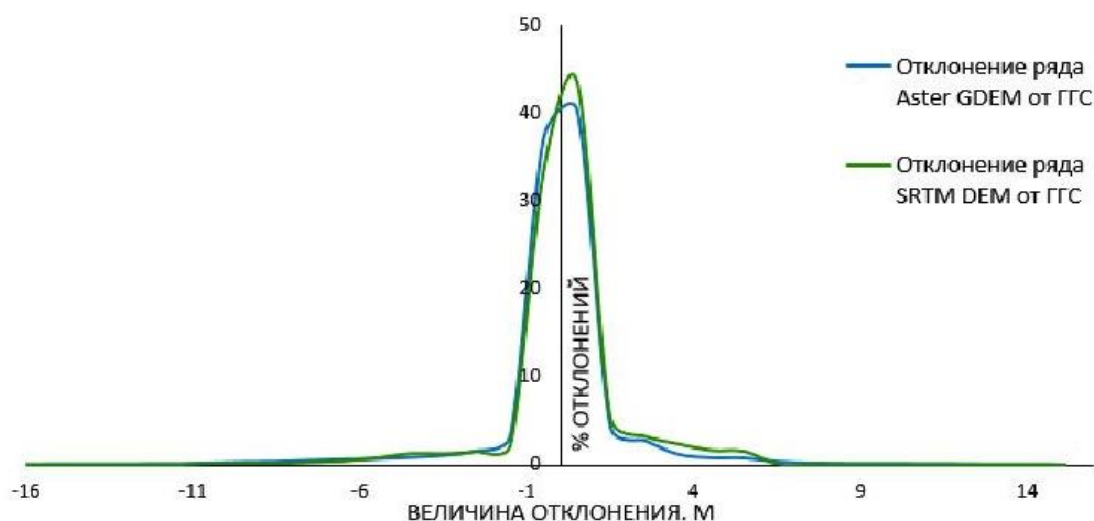


Рисунок 29. График суммы процента отклонений ряда «новых» отметок

В результате полученная ЦМР, приведенная к Балтийской системе высот, обеспечивающая точность высотной модели рельефа местности с высотой сечения рельефа в 5 метров. Построения выровненной DEM выполнялись в программе VolGA [69], специально разработанной для целей трёхмерного моделирования рельефа местности, его визуализации, а также решения аналитических геоинформационных задач.

Программный комплекс Volume Graphic Analyzer (VolGA) предназначен для обработки спутниковых данных дистанционного зондирования Земной поверхности, построения на их базе трехмерных моделей рельефа местности, их визуализации, а также решения на их базе аналитических геоинформационных задач. В качестве входных данных VolGA использует файл с данными спутникового дистанционного зондирования в текстовом варианте формата Terrain Matrix, полученном на базе данных спутниковой радиолокационной съемки Земли (SRTM). Программа строит 3D модели рельефа Земной поверхности, визуализирует их, а также позволяет решать ряд специфических аналитических задач геоинформатики, таких, например, как определение суммарной длины береговых линий водоемов, построение карты уклонов местности и других. Возможен экспорт построенных моделей рельефа местности в форматах STL и DXF для использования их в рамках стандартных ГИС.

В связи с тем, что данные ГГС имеют не постоянный коэффициент покрытия территорий (плотность пунктов не постоянная) в результирующих матрицах возникли сильные локальные всплески ошибок. Повысить качество перевычисления отметок матриц может использование данных более плотного и постоянного покрытия территории пунктами ГГС с известными отметками, натурные измерения с использованием спутникового навигационного оборудования или использование данных ДЗЗ используя интерферометрический метод [14] или используя космические снимки высокого пространственного разрешения [74].

Использование подобных матриц может заменить традиционные методы работ в целом ряде гидрологических, геоморфологических, экологических и т.д. исследований. При этом будет обеспечена достаточная точность исходных данных. Недостатком использования такого метода может являться то, что поправки в исходную модель вносятся повсеместно и полностью не устраняют влияние растительного покрова, т.е. на участках древесно-кустарниковой растительности будут встречаться остаточные отклонения, но имеющие абсолютные значения, локально поддающиеся повторной корректировки.

3.2. Распознавание растительных массивов на космических снимках (NDVI)

Бесплатный продукт ГИС QGIS позволяет работать с многоспектральными изображениями, полученными по результатам космических съёмок.

В 1973 году на симпозиуме «Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS» группой учёных во главе с Роусе Й. В. был предложен метод для получения контуров растительного покрова с качественными и количественными характеристиками в результате определённого сложения различных каналов спектральных снимков. Данный метод называли – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и используют для максимально быстрого поиска и оценки «живой зелёной» растительности на поверхности Земли [77].

Суть метода в использовании принципа отражения и поглощения световых лучей определённого спектра в видимом красном (VIS) и ближнем инфракрасном (NIR) диапазоне.

$$k_{NDVI} = \frac{(\lambda_{NIR} - \lambda_{VIS})}{(\lambda_{NIR} + \lambda_{VIS})} \quad (28)$$

где k_{NDVI} – вегетационный индекс, λ_{NIR} – коэффициент отражения в ближней инфракрасной зоне спектра, λ_{VIS} – коэффициент отражения в видимой красной зоне спектра.

Расчёт вегетационного индекса опирается на особенности спектральной кривой отражения сосудистых растений: в красной области спектра ($0,6 \leq \lambda_{VIS} \leq 0,7$ мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области ($0,7 \leq \lambda_{VIS} \leq 1,0$ мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведёт к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет чётко отделять и анализировать растительные от прочих природных объектов. Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений как различия в освещённости снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и пр.

NDVI может быть рассчитан на основе любых снимков высокого, среднего или низкого разрешения, имеющим спектральные каналы в красном (0,55-0,75 мкм) и инфракрасном диапазоне (0,75-1,0 мкм), примеры таких снимков приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Комбинации каналов камер спутников, используемые для расчёта NDVI [77]

Пространственное разрешение, м	Спутники / программы исследований	Каналы
15	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTERGDEM)	2 (0.63-0.69 мкм), 3 (0.76-0.86 мкм)
23,5	Linear Imaging Self Scanning Sensor (LISS-III)	2 (0.62-0.68 мкм), 3 (0.77-0.86 мкм)
30	Landsat (4, 5, 7)	3 (0.63-0.69 мкм), 4 (0.76-0.90 мкм)
500	Moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS)	1 (0.62-0.67 мкм), 2 (0.841-0.876 мкм)
1100	Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) NOAA	1 (0.58-0.68 мкм), 2 (0.725-1.00 мкм)

Ниже, на рисунке 30, приведена схема соотношения численного значения индекса NDVI с характеристикой растительного покрова по индексу растительности k_{NDVI} и других объектов местности.



Рисунок 30. Схема соотношения численного значения индекса NDVI с характеристикой растительного покрова

Ниже, на рисунке 31, приведена последовательность решения задачи получения контуров растительности в ГИС QGIS по снимкам со спутников Landsat (5). Выбор данных спутниковых снимков обусловлен величиной пространственного разрешения в 30 м, как оптимального значения наиболее подходящего для моделей рельефа SRTM и AsterGDEM.

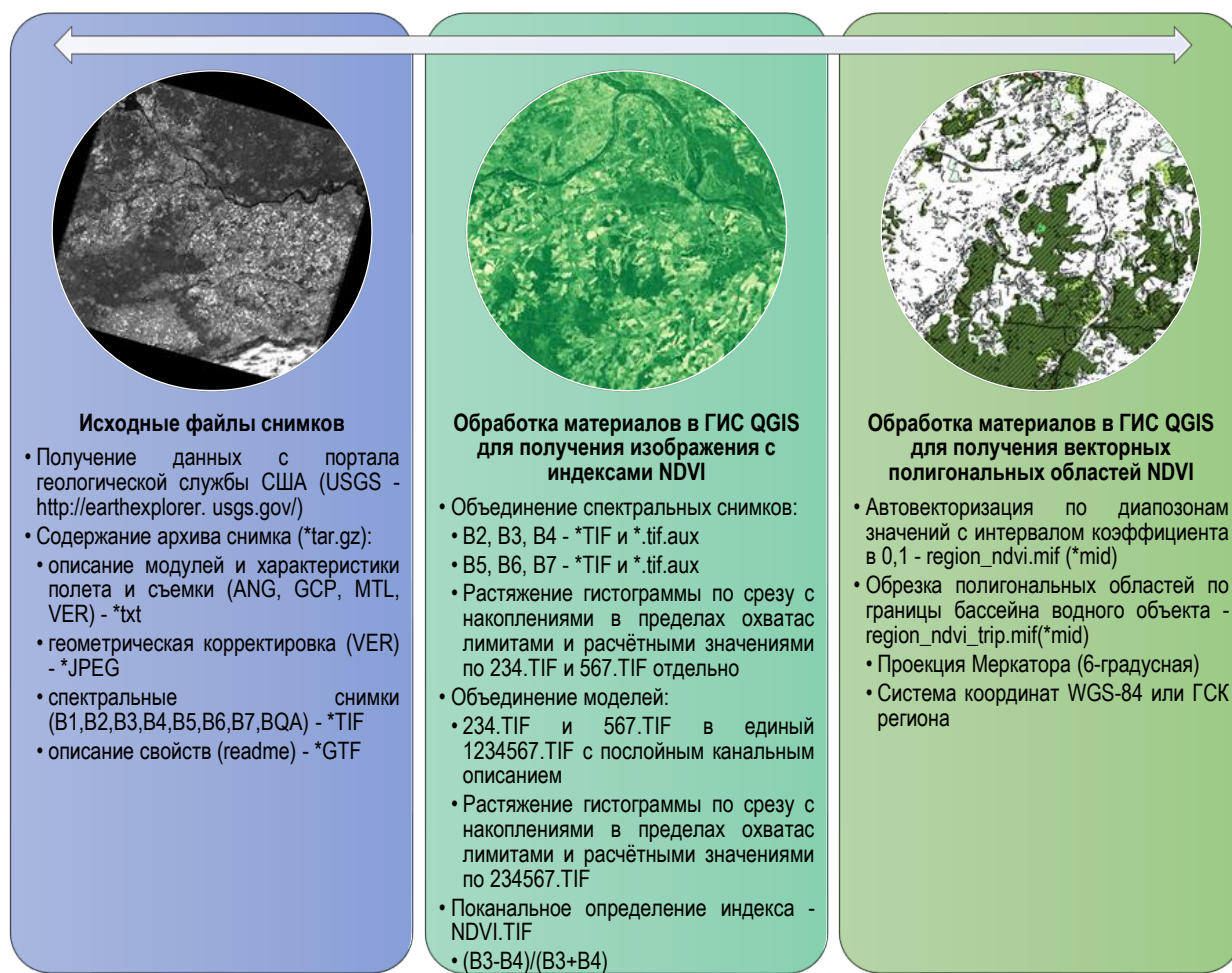


Рисунок 31. Схема получения контуров высокоствольной растительности по индексу NDVI с использованием открытого ПО ГИС QGIS

Контроль качества определения границы растительности проверялся по совмещению полигональных областей: определённых полигонов растительности из NDVI и контуров растительности и угодий из топографических карт (рис. 32).

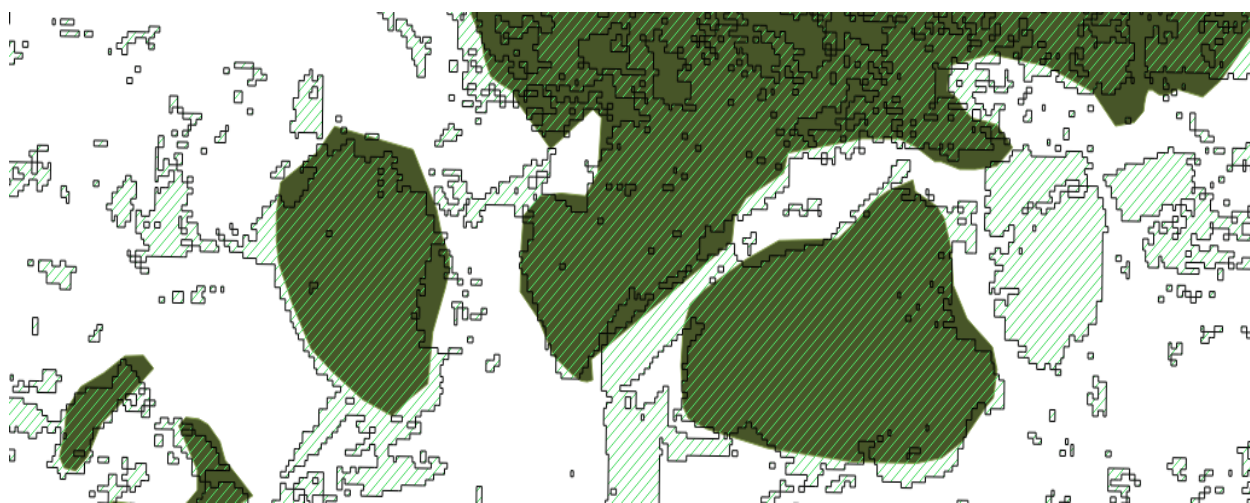


Рисунок 32. Часть сводной контрольной схемы регионов высокоствольной растительности

Учитывая разницу в периоде обновления топографических карт и планов, позволяет говорить о правильности выборки полигонов в части того, что основной объём регионов NDVI (более 80%) совпадает с картографическими объектами. Результат определения полигонов растительности приведён на рисунке 33.

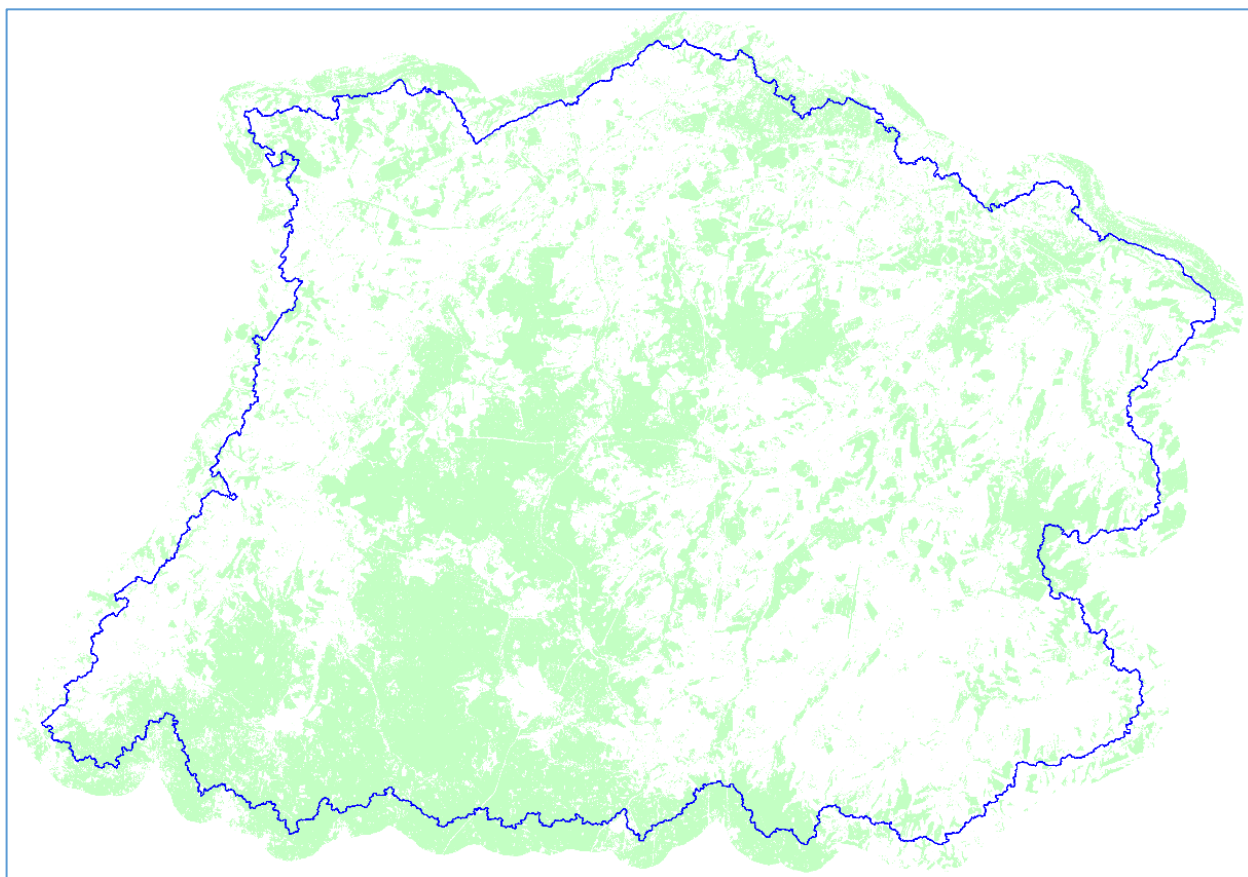


Рисунок 33. Полигоны, полученные из NDVI на территорию исследуемого бассейна водного объекта по снимкам Landsat 5 на 2009 г.

3.3. Верификация полученных данных и сравнение параметров реальной поверхности и ее измененной модели

Учитывая, что различные методы интерполяции при одних и тех же входных данных создают различные выходные поверхности, то для восстановления рельефа необходимо подобрать такой метод, который бы максимально позволил описать поверхность без существенной потери качества. В случае с выбором метода необходимо учесть, что методы IDW и Kriging, в отличие от других не являются строгими и могут быть использованы для вероятностного интерполирования при восстановлении значений рельефа местности. В дальнейшем будут использованы именно методы по восстановлению модели рельефа,

которые учитывают взвешенные характеристики, т.к. позволяют подобрать необходимые коэффициентные значения или функции зависимости.

Для проведения геометрических преобразований поверхности рельефа использована регулярная матрица в виде участка местностей размером 3400×3400 точек (рис. 34 а) в пределах которой искусственно создана группа с измененными высотами (рис. 34 б)

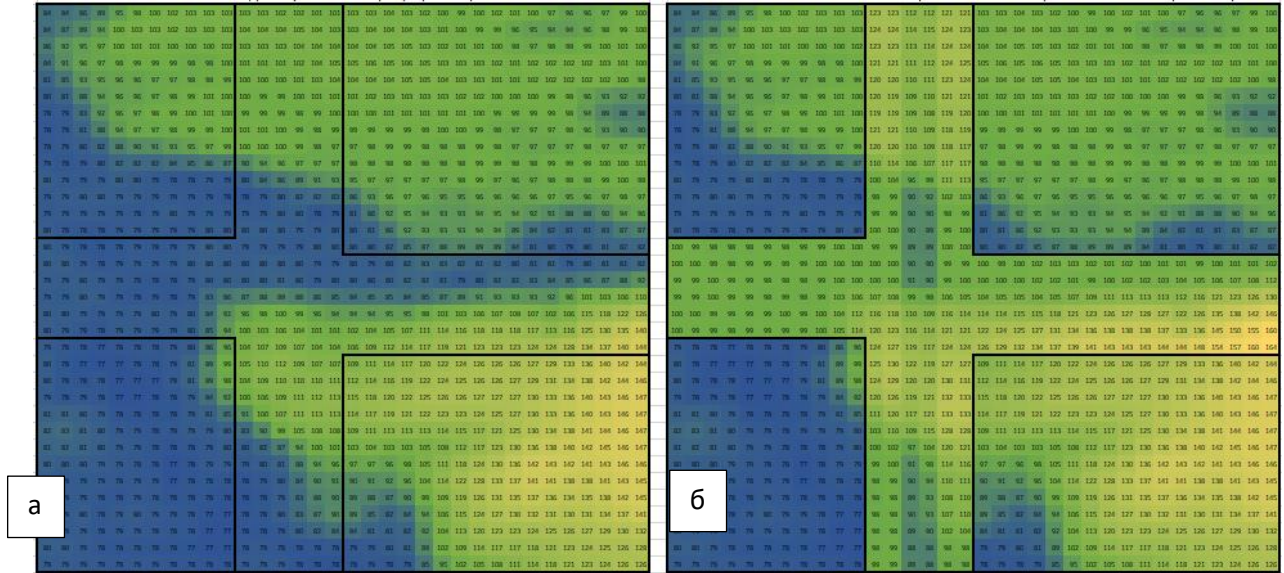


Рисунок 34. Часть матрицы высот для анализа: а – исходная, б – измененная

Для исследования принято решение последовательного приближения восстанавливаемой поверхности путем обхода измененного участка окнами различными размерностями 3×3 , 5×5 , 7×7 и 9×9 , причем с учетом радиального и ортогонального распределения (рис. 35). После чего выполнялось сравнение исходной и выровненной поверхности (рис. 36).

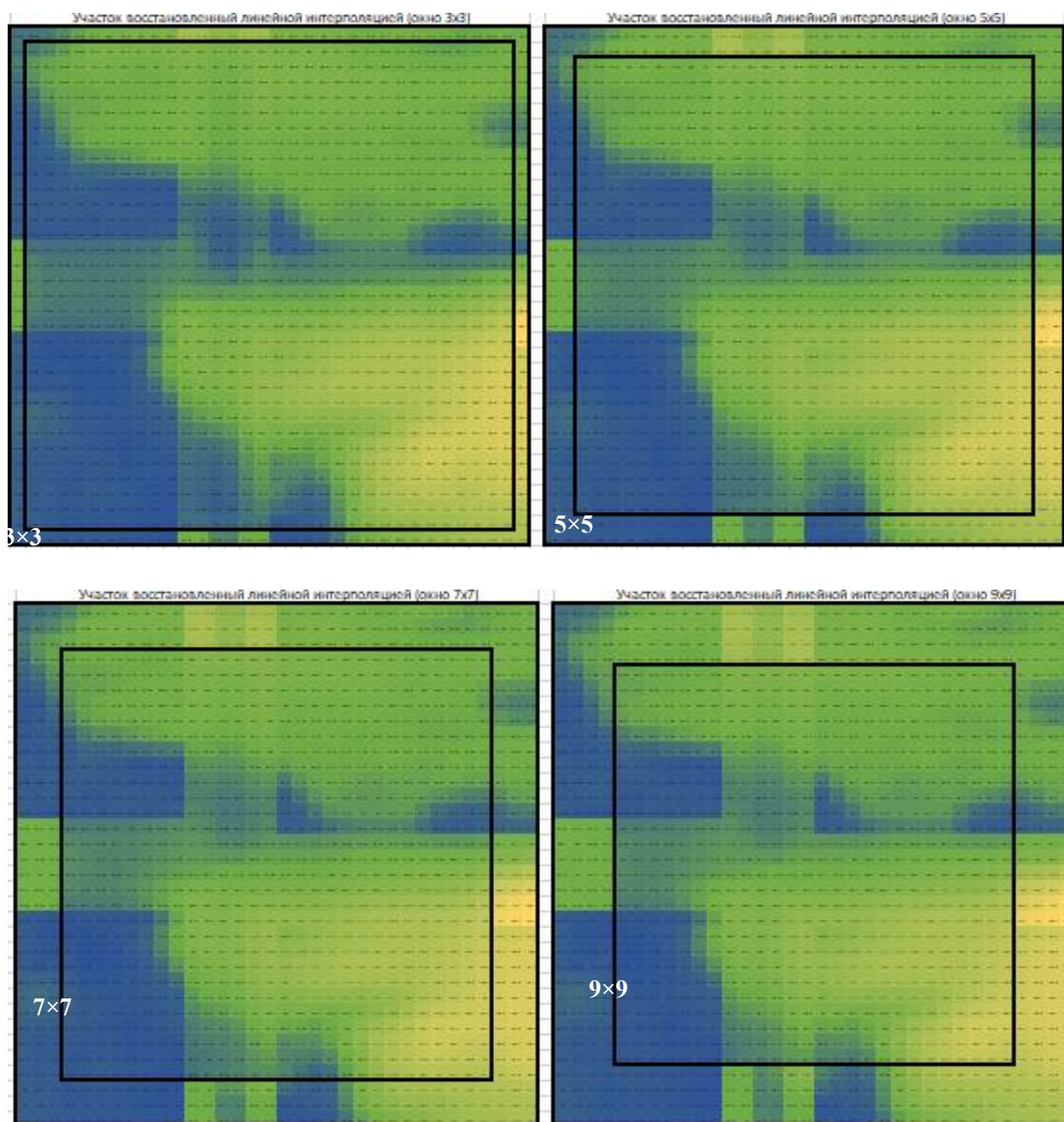


Рисунок 35. Часть восстановленной матрицы высот с использованием окрестностей разных размерностей (3×3 , 5×5 , 7×7 и 9×9)

В аналитических вычислениях использовались методы интерполяции с различными весовыми коэффициентами: TIN, IDW (с использованием степеней веса «1» и «2»), Kriging (с использованием функции нормального распределения Гаусса степеней «1» и «2», и комбинированных), NN. Результаты восстановления значений приведены на рисунке 37.

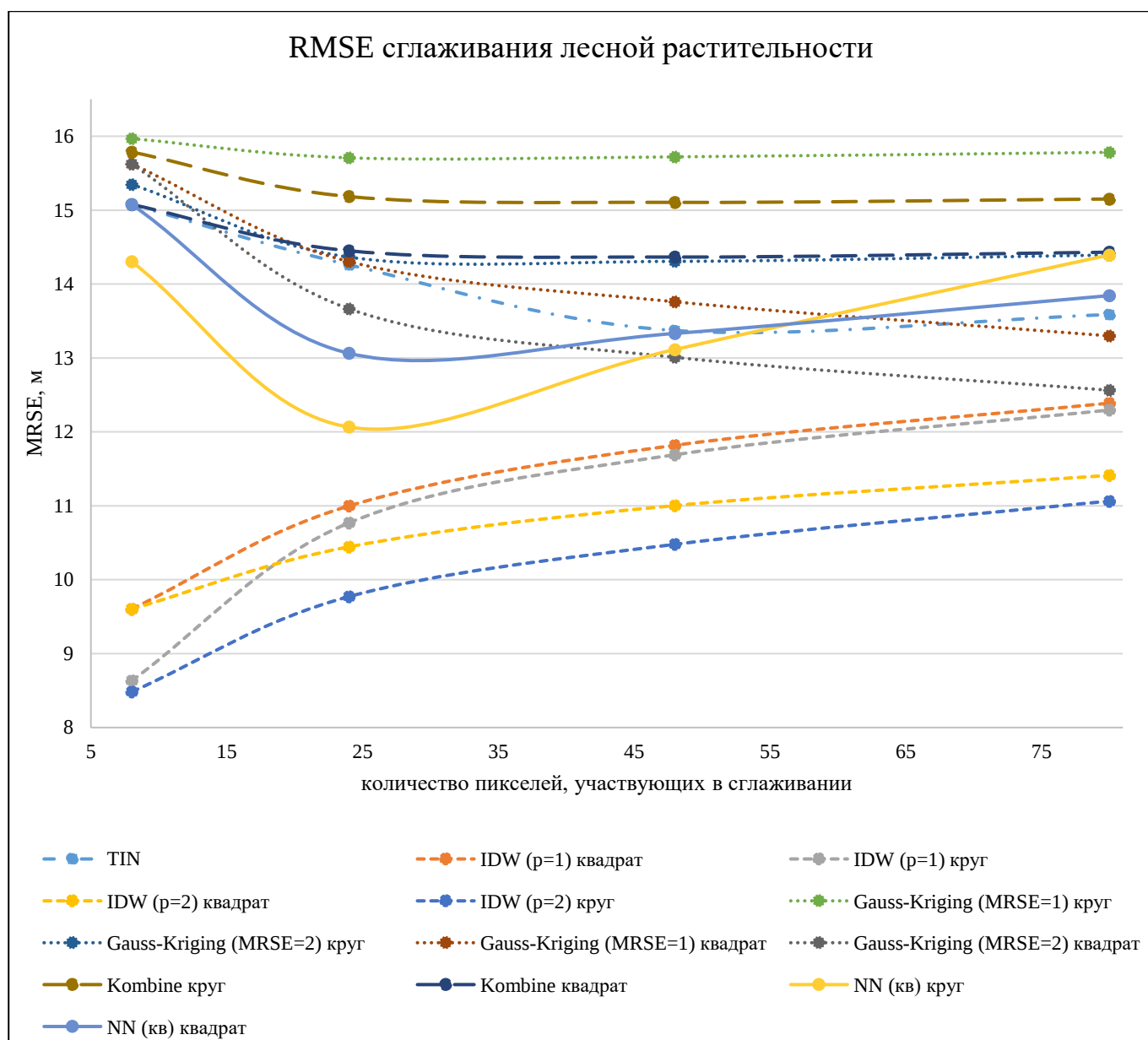


Рисунок 36. График распределения ошибки интерполяции поверхностей различными методами: TIN, IDW (с использованием степеней веса «1» и «2»), Kriging (с использованием функции нормального распределения Гаусса степеней «1» и «2», и комбинированных), NN

Использование при интерполировании только коэффициенты весовой функции не позволяет качественно выполнить восстановление значения высоты в ячейке, так же как любой другой существующий метод интерполяции, для чего необходимо дополнительно определить весовые значения коэффициентов пикселей в задаваемой окрестности.

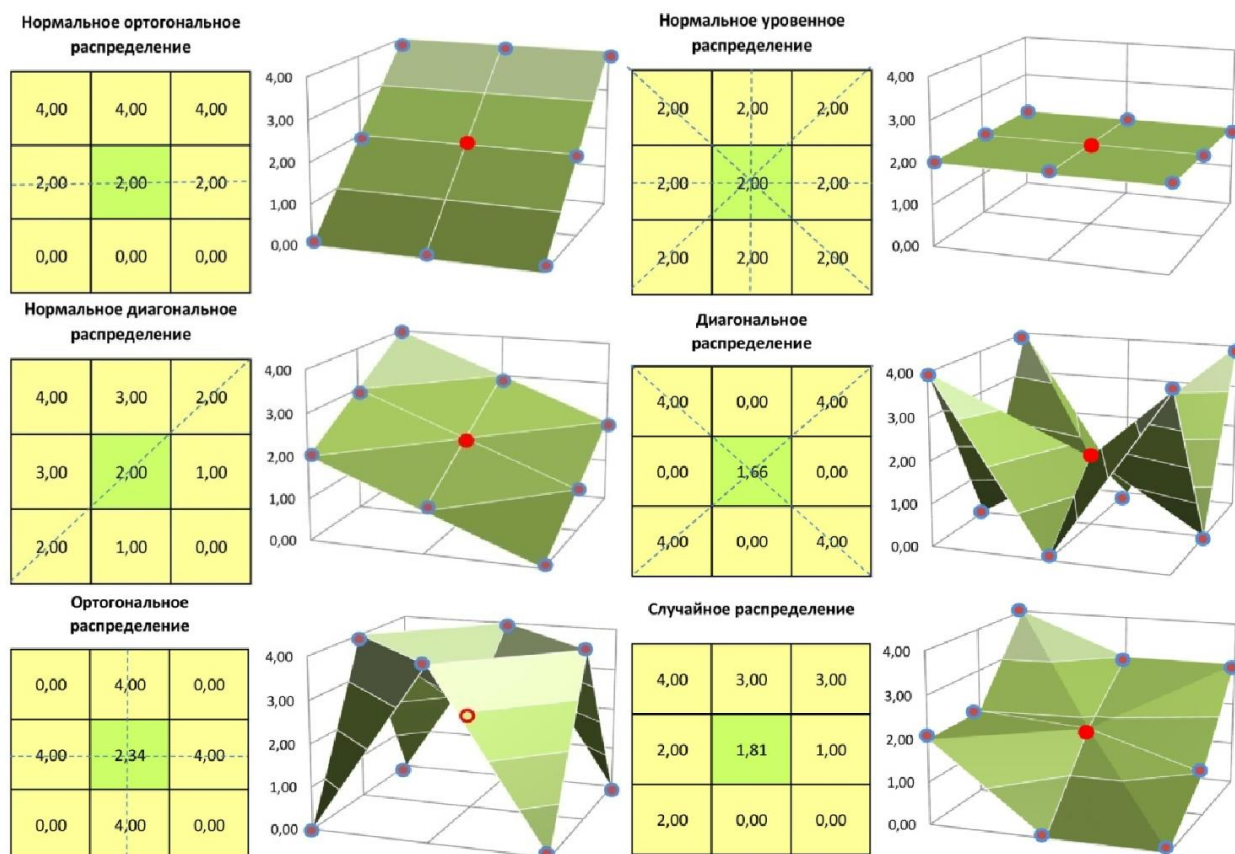


Рисунок 37. Схема графического решения предлагаемого метода для определения отметки центрального пиксела (примеры по частным графическим вариациям)

3.4. Корректурa по элементам (с учётом растительного покрова)

При рассмотрении более общих условий и не использовании переборов множества пикселей, с достижением близкого результата можно использовать усреднённые величины значений буферных зон, выстроенных вокруг лесных массивов. Для определения средней поправки (усреднённая высота деревьев) в Z-отметку участка территории, покрытого лесом: определяется разность средней отметки участка леса и средней отметки участка буферной зоны вокруг него (рис. 38). Поверхность для корректуры исходной DEM с информацией о границах, а в дальнейшем и высоте древесной растительности, получаются из данных ДЗЗ, путём определения индекса NDVI (стандартизированный индекс различий растительного покрова). Для качественного восстановления значения высоты в точке, пиксели, принадлежащие группе древесной растительности, не включаются в обработку до момента их корректуры [44].

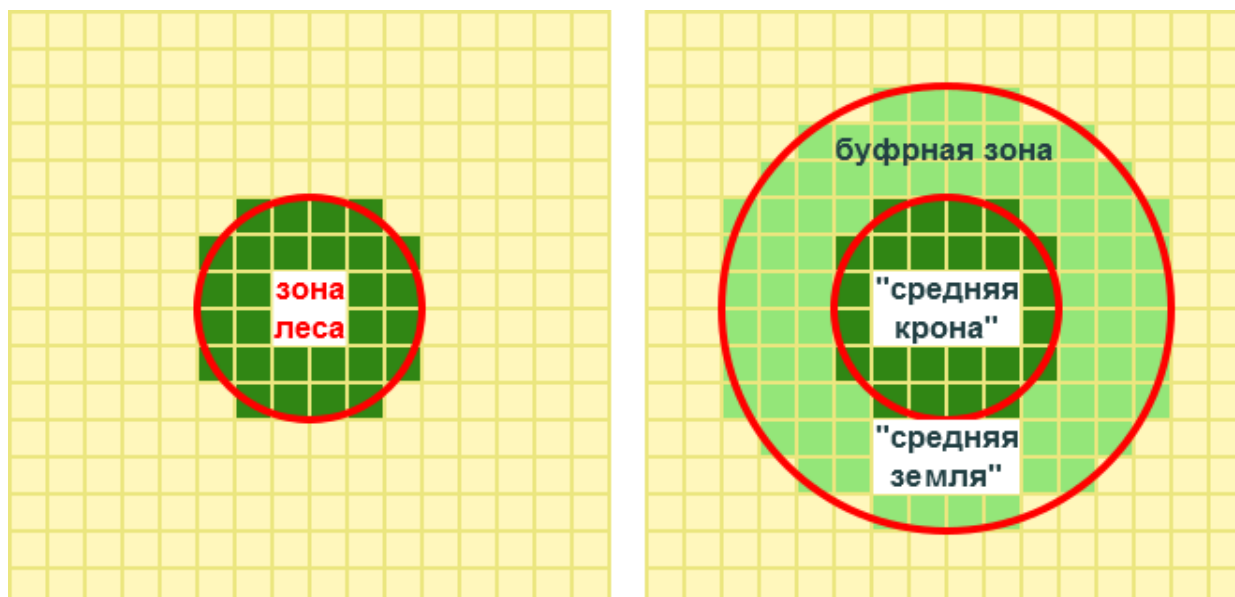


Рисунок 38. График распределения весового влияния пикселя на значение весовой

Оценка точности результирующей DEM выполнялась в программном обеспечении QGIS [192] с построением гистограммы отклонений (рис. 39). Результаты показали, что более 90% всех отклонений внутри лесного массива находятся в пределах 5 метров.

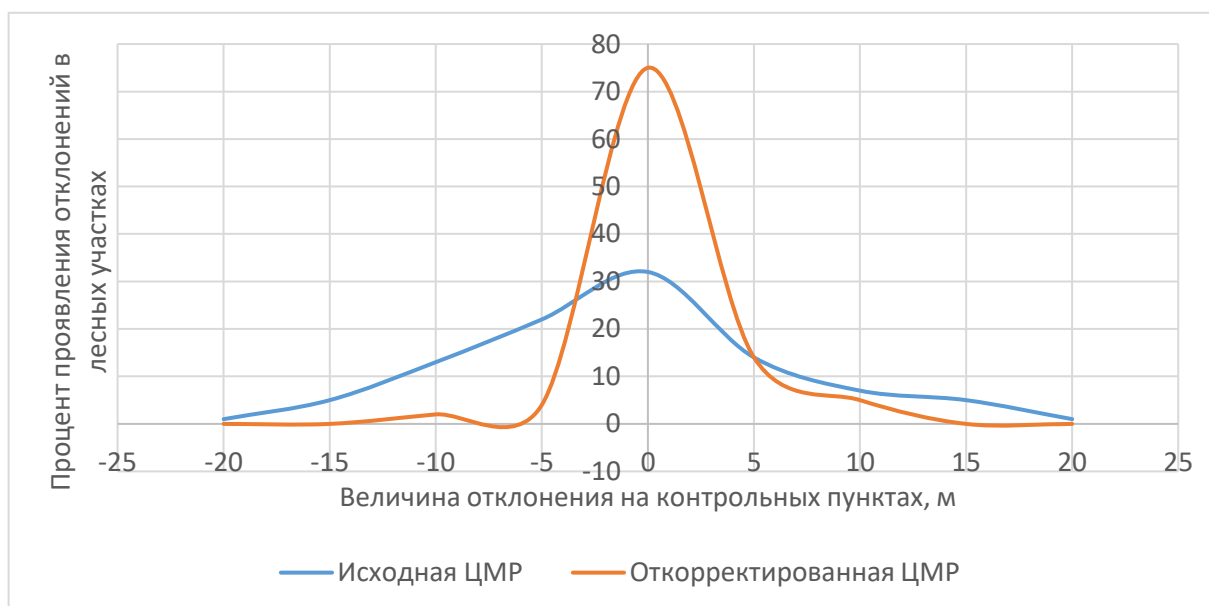


Рисунок 39. Гистограмма отклонений DEM

Приведённый метод «редактирования» высот DEM (в том числе, в пределах территории покрытых лесной растительностью), позволяет привести модель к Балтийской системе высот и обеспечить точность до 5 метров.

Ниже (рис. 40) показан участок исходной DEM с обозначением границы лесной растительности. После определения корректурной поверхности было выполнено сложение

исходной DEM и поверхности обратной корректирующей. После получения результирующей DEM и её визуализации, была проведена операция оценки качества полученных результатов по методу, описанному в [29]. Оценка точности результирующей DEM выполнялась в программном обеспечении QGIS [192] с построением гистограммы отклонений. Результаты показали, что более 90% всех отклонений находятся в пределах 5 метров.

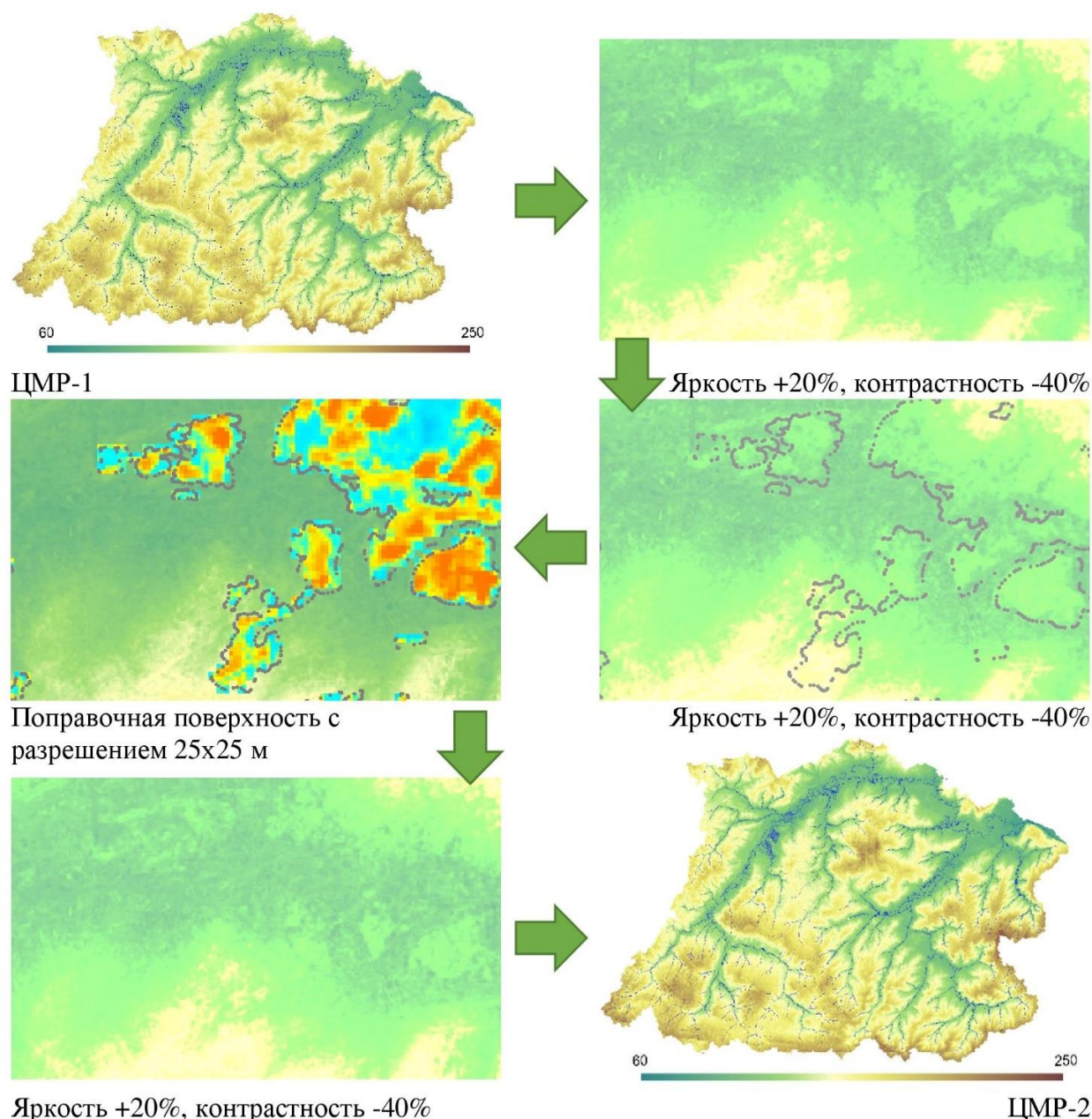


Рисунок 40. Порядок корректуры модели рельефа

Приведённый способ «редактирования» высот DEM через поверхности отклонений (в пределах территории покрытых лесной растительностью), позволяет привести модель к Балтийской системе высот и обеспечить точность до 5 метров.

Предлагаемый метод корректировки, был также проверен на участке модели с использованием тех же методов интерполяции с различными весовыми коэффициентами, что и в разделе 2 работы: TIN, IDW (с использованием степеней веса «1» и «2»), Kriging (с использованием функции нормального распределения Гаусса степеней «1» и «2», и комбинированных), NN. Для подтверждения ранних предположений, что использование дополнительно коэффициентов из интерполяционного полинома Лагранжа при интерполировании, так же выполнен анализ модели и с их учетом. Результаты восстановления значений рельефа после исключения средней кроны приведены на рисунке 41.

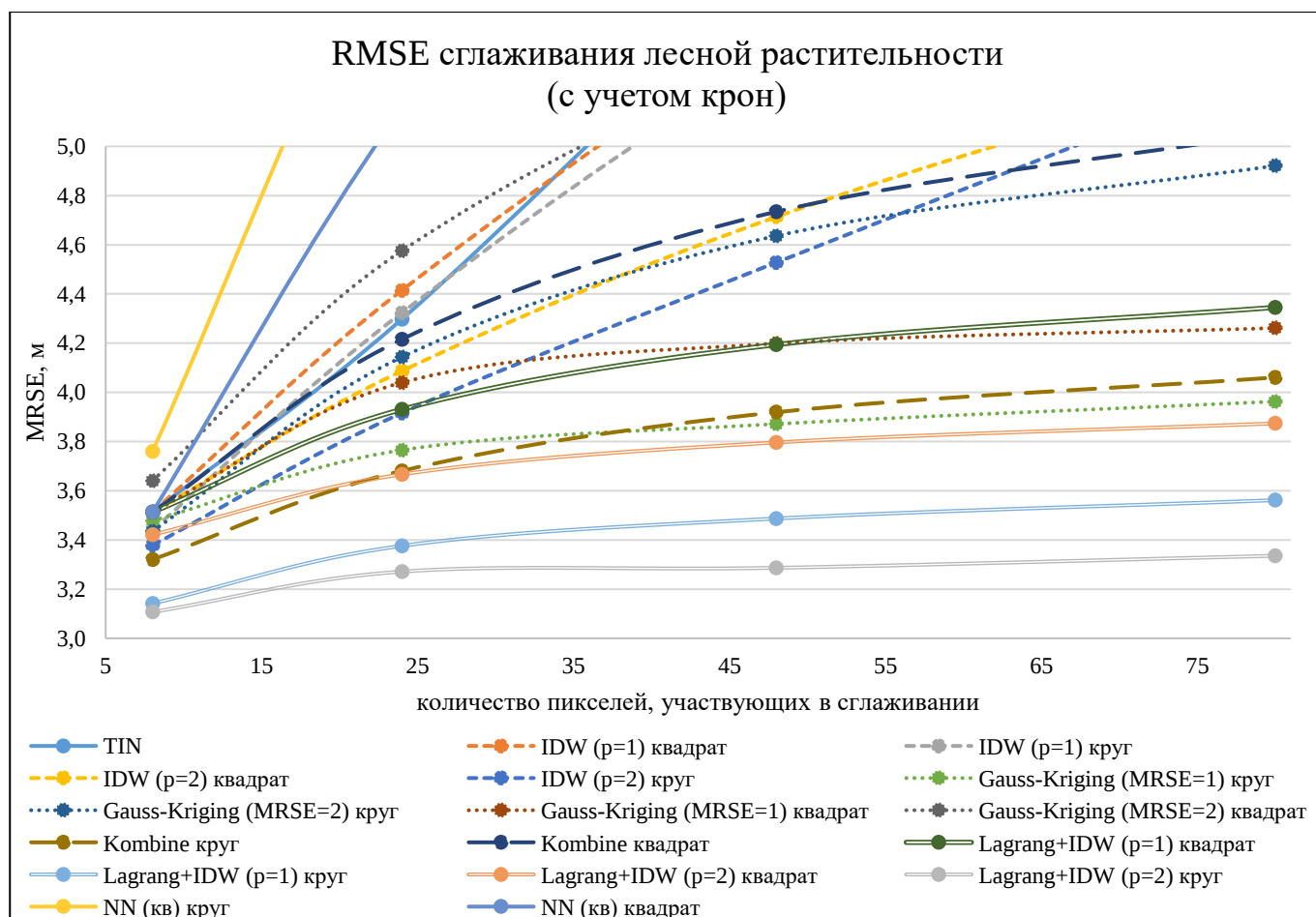


Рисунок 41. График распределения ошибки интерполяции поверхностей различными методами: TIN, IDW (с использованием степеней веса «1» и «2»), Kriging (с использованием функции нормального распределения Гаусса степеней «1» и «2», и комбинированных), NN, IDW (с использованием степеней веса «1» и «2» и весовых коэффициентов интерполяционного полинома Лагранжа)

Как видно из рисунка 41, предлагаемый метод показывает результаты лучше других при использовании кругового распределения коэффициентов, при применении размерности окна $D=1$ или $D=2$ и степени «2».

Проведенные в рамках диссертационной работы исследования позволили разработать метод корректуры поверхностей рельефа и восстановления высотных значений ячеек за счёт исключения влияния лесных массивов и обеспечили создание откорректированных глобальных цифровых моделей рельефа средствами ГИС (рис. 42).

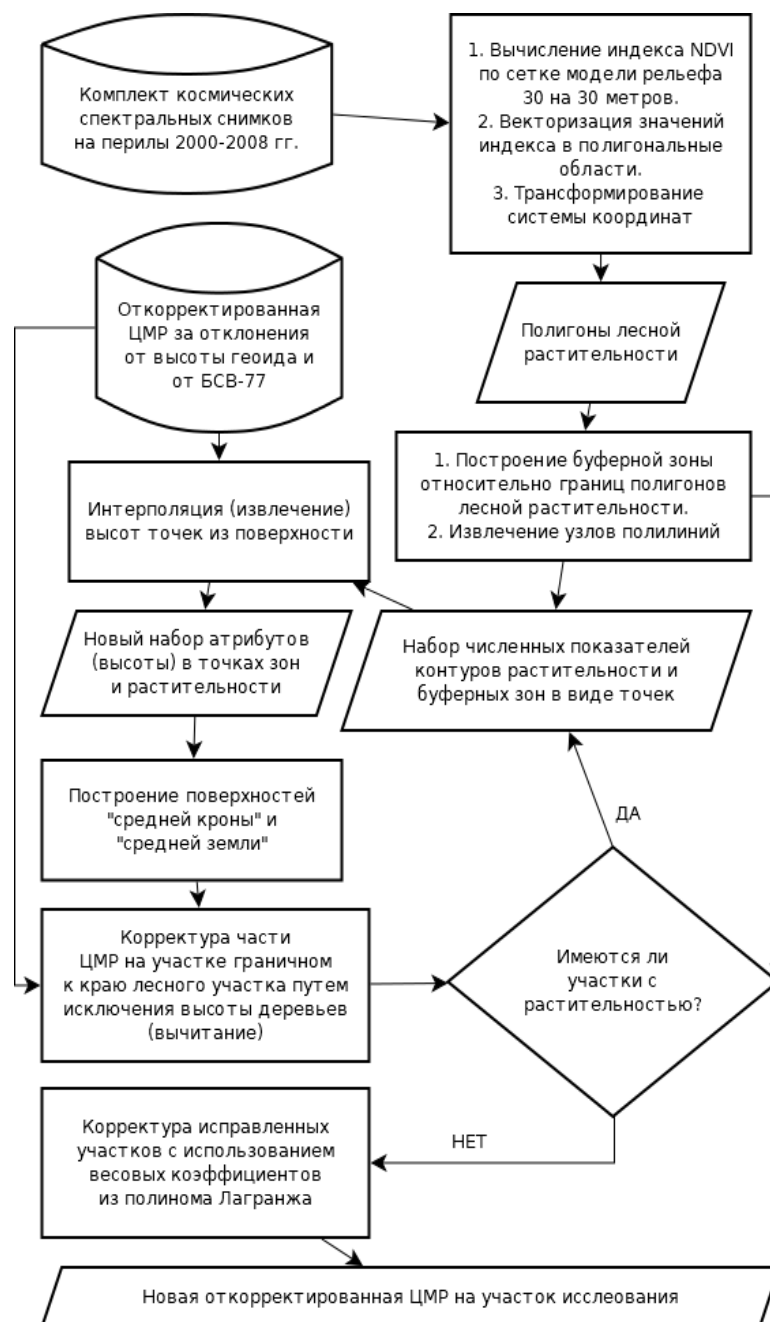


Рисунок 42. Порядок построения откорректированных глобальных цифровых моделей рельефа средствами ГИС

Построения поверхностей выполнялось в свободной географической информационной системе с открытым кодом – QGIS, доступной любому пользователю сети Интернет, по материалам, открыто выложенным и бесплатно предоставляемым зарубежной службой NASA на своём портале. В связи с ограниченной возможностью трёхмерной визуализации данных в открытом ПО, выровненная DEM в трёхмерном виде строилась в программе VolGA, специально разработанной для целей трёхмерного моделирования рельефа местности, его визуализации, а также решения аналитических геоинформационных задач.

Использование подобных матриц может заменить традиционные методы работ в целом ряде гидрологических, геоморфологических, экологических и т.д. исследований, причём, с экономической точки зрения, данный метод подготовки DEM выгоден и имеет качественные результаты.

3.5. Трёхмерная визуализация объектов бассейновых ГИС

3.5.1. Общие вопросы формирования стереоскопических изображений

Видение человека обеспечивает 3D восприятие мира. Компьютерные технологии могут воссоздать такую возможность на 2D-мониторе с помощью нескольких методов. Анаглифы – это простой, но эффективный метод передачи восприятия глубины, который позволяет создать трёхмерное восприятие ЦМР. Разработанная VolGA позволяет непрерывно создавать трёхмерное изображение, а полученные изображения в дальнейшем преобразовывать в анаглифы, погружая оператора в пространство ЦМР. Любая ЦМР, в том числе и откорректированная может быть использована для первичной визуальной оценки состояния территорий для последующего более углубленного изучения [211].

Формирование трёхмерных моделей объектов в настоящее время выполняется с использованием современных систем пространственного геометрического моделирования. В то же время, одним из сложнейших и наиболее важных направлений является визуализация сформированных геометрических объектов с помощью средств отображения. Более того, практическое применение методов компьютерного геометрического моделирования невозможно без средств визуализации вообще. Проблемы разработки средств визуального отображения объектов решались научными исследователями всегда. Эволюцию аналитических знаний о визуализации можно проследить в изобразительном искусстве. Появление новых стилей связано с развитием знаний в обществе и сменой общего

восприятия окружающего мира. Изобразительное искусство, в своём большинстве, стремилось как можно реалистичнее визуализировать (отобразить) окружающий мир.

«При формировании стереоскопического образа и стереоскопической модели зрительная система человека работает по-разному. В первом случае непрерывно, но согласованно меняется конвергенция и аккомодация глаз, во втором – этот физиологический механизм не действует. С целью некоторого упорядочения терминологии можно воспользоваться предложенной единой классификацией пространственных моделей, которая предусматривает три иерархических уровня (рис. 43)» [24, с. 72].

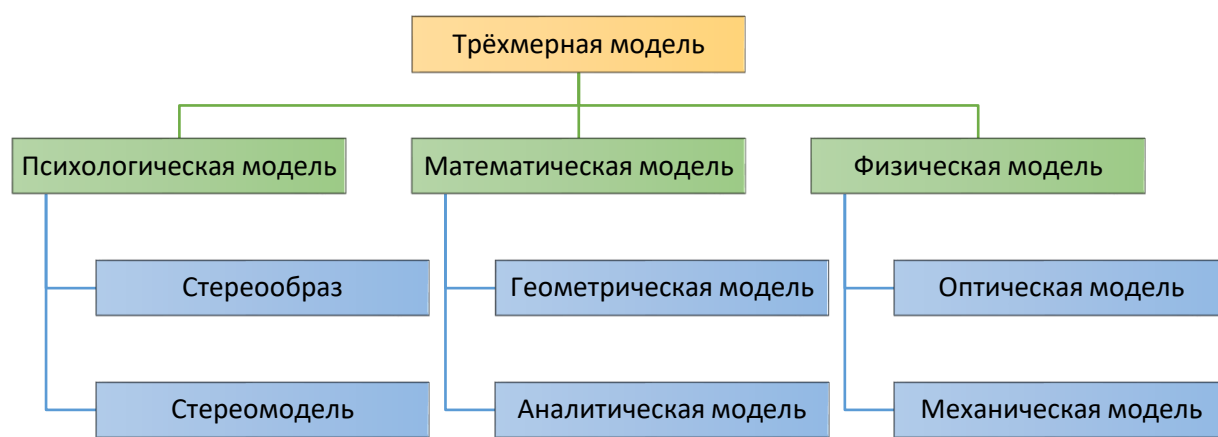


Рисунок 43. Классификация стереоскопических моделей (по [24])

В результате накопления научных знаний, появились такие понятия как перспектива, стереоскопия, геометрическое моделирование, виртуальная реальность и т.д. В настоящее время окончательно признано, что наибольшей информативностью обладают системы визуализации пространственных моделей с использованием частичного или полного погружения исследователя в среду. Такими свойствами обладают системы, использующие стереоскопический эффект для визуализации пространственных моделей. Наблюдать стереоскопические модели можно различными способами: оптико-бинокулярный, анаглифический, светозатворный (обтюрационный, эклипсный), поляризационный и безочковый [23]. Учитывая преимущества и недостатки каждого из них, для проведения исследования, подробнее будет рассмотрен анаглифический способ наблюдения стереоскопических моделей (изображений-анаглифов). «Способы формирования стереомодели не оказывают существенного влияния на точность компьютерных стереоизмерений» [23, с. 120].

«Как известно трёхмерные модели рельефа позволяют вычленить основные топографические единицы: тальвеги и водоразделы, формирующие основную пластику поверхности» [46, с. 13]. Пространственная визуализация подобных моделей в виде изображений-анаглифов имеют большие преимущества в связи с частичным погружением исследователя в моделируемую «среду».

Процесс формирования изображений-анаглифов имеет несколько обязательных условий: наличие двух изображений одного и того же объекта (модели), полученных из двух точек пространства и осуществление их математического сложения и цветового сдвига (спектральное разделение).

При проецировании на экран стереопары анаглифических изображений достаточно многочисленная аудитория, например, студенческая группа, может коллективно наблюдать пространственную модель с помощью простейших цветных очков-светофильтров. Для научных целей или при принятии коллегиальных решений это имеет принципиальное значение, поскольку почти все традиционные стереоприборы рассчитаны на индивидуальное пользование одним наблюдателем [22].

При выборе исходных показателей для формирования анаглифа, необходимо учесть, тот факт, что сформировать стереомодель объективной пространственной выразительности возможно при соблюдении конкретных геометрических и цветовых условий, а также, при обеспечении непротиворечивого взаимодействия бинокулярных и монокулярных факторов объемного восприятия. До того, как говорить подробнее о цветовых преобразованиях необходимо определить геометрические особенности трёхмерного восприятия изображений при бинокулярном зрении и построение изображений-анаглифов. Для создания стереоэффекта необходимо иметь пару изображений, расположенных в одной сферической поверхности (VSI – Virtual Surface Image) с бесконечно большим радиусом. Учитывая использование «искусственного» объекта (трехмерная модель), каждый элемент пары L_{img} и R_{img} (рис. 44), по отношению к пользователю, должен быть сдвинут на угол конвергенции (γ), с учетом остроты зрения (рис. 45) [57].

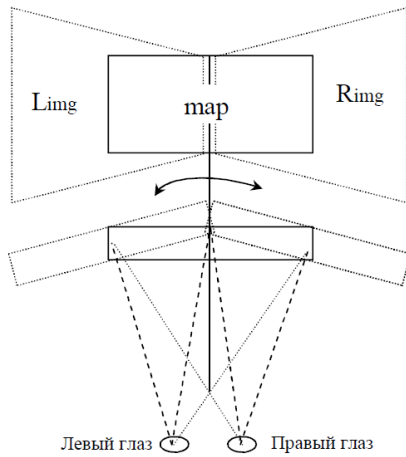


Рисунок 44. Программное получение пары изображений «искусственных» объектов [46, с. 14]

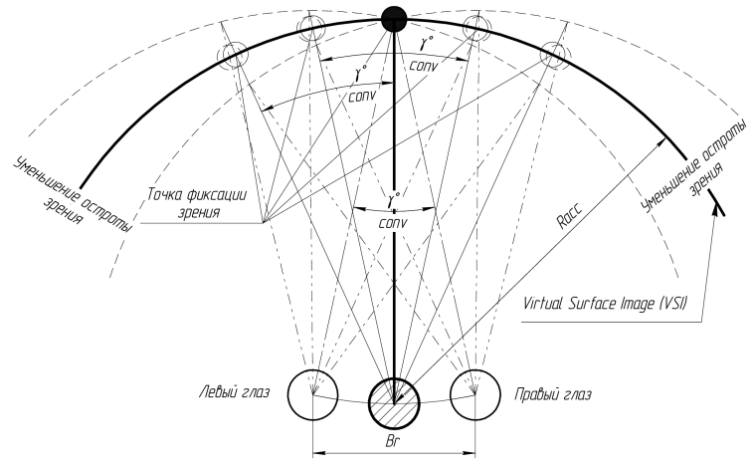


Рисунок 45. Трёхмерное восприятие изображения при бинокулярном зрении [46, с. 14]

В настоящее время существует большое число методов синтеза цветных сдвигов изображений и как следствие, много различных изображений-анаглифов: серый, желтый, красно-голубой, «оптимизированный» [174] и т.д.

Математически синтезированный цвет для цветовоспроизведения пикселя двух изображений (левое – L и правое – R) можно представить в виде матрицы суммарного преобразования аддитивной цветовой модели (RGB) – матрично-векторное умножение и сложение:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lk_r^1 & lk_r^2 & lk_r^3 \\ lk_g^1 & lk_g^2 & lk_g^3 \\ lk_b^1 & lk_b^2 & lk_b^3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L_r \\ L_g \\ L_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} rk_r^1 & rk_r^2 & rk_r^3 \\ rk_g^1 & rk_g^2 & rk_g^3 \\ rk_b^1 & rk_b^2 & rk_b^3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_r \\ R_g \\ R_b \end{bmatrix}$$

где L – пиксель левого ракурса, R – пиксель правого ракурса; $L_r, L_g, L_b, R_r, R_g, R_b$ – компоненты пикселя red, green, blue, соответствующего ракурса, $lk_r^1, lk_r^2, lk_r^3, lk_g^1, lk_g^2, lk_g^3, lk_b^1, lk_b^2, lk_b^3$ – коэффициенты фильтра для смещения левого ракурса, $rk_r^1, rk_r^2, rk_r^3, rk_g^1, rk_g^2, rk_g^3, rk_b^1, rk_b^2, rk_b^3$ – коэффициенты фильтра для смещения правого ракурса, при условиях, что $\sum_{i=1}^3 (lk_r^i, rk_r^i) \cong 1$; $\sum_{i=1}^3 (lk_g^i, rk_g^i) \cong 1$; $\sum_{i=1}^3 (lk_b^i, rk_b^i) \cong 1$,

$$\text{Rank} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = 3, 0 \leq L_{r,g,b} \leq 255; 0 \leq R_{r,g,b} \leq 255.$$

Ниже приведены примеры синтеза цветов пикселей изображений-анаглифов.

Серый анаглиф:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L_r \\ L_g \\ L_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_r \\ R_g \\ R_b \end{bmatrix}$$

Красно-голубой анаглиф:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L_r \\ L_g \\ L_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_r \\ R_g \\ R_b \end{bmatrix}$$

Оптимизированный анаглиф [56]:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +0.4155 & +0.4710 & +0.1670 \\ -0.0458 & -0.0484 & -0.0258 \\ -0.0545 & -0.0614 & +0.0128 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L_r \\ L_g \\ L_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0109 & -0.0365 & -0.0060 \\ +0.3756 & +0.7333 & +0.0111 \\ -0.0651 & -0.1286 & +1.2968 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_r \\ R_g \\ R_b \end{bmatrix}$$

Для применения цветового фильтра и совмещения пары изображений использовалась бесплатная программа «AnaglyphMaker» (Ver 1.08), разработанная японским фотографом Такаши Секитани в 2004 году [46].

3.5.2. Оптимизация параметров построения стереоизображений-анаглифов цифровой модели рельефа

В качестве объекта, демонстрирующего основные принципы построения анаглифических изображений, используется простая фигура в виде четырёхгранной пирамиды (рис. 46). Создаваемые элементы (левое и правое изображение) пары строятся при определённых условиях, т.е. при четырёх значениях расстояний от точки восприятия изображения (один из глаз) до картинной поверхности (VSI – Virtual Surface Image) – R_{acc} . R_{acc} для исследования принималась равными 750, 563, 375 и 188 мм. Базис между лучами фокусировки зрения (B_f) составлял 65 мм и являлся величиной постоянной. Данные численные значения обоснованы физиологическими особенностями зрения человека и элементарными правилами техники безопасности [47].

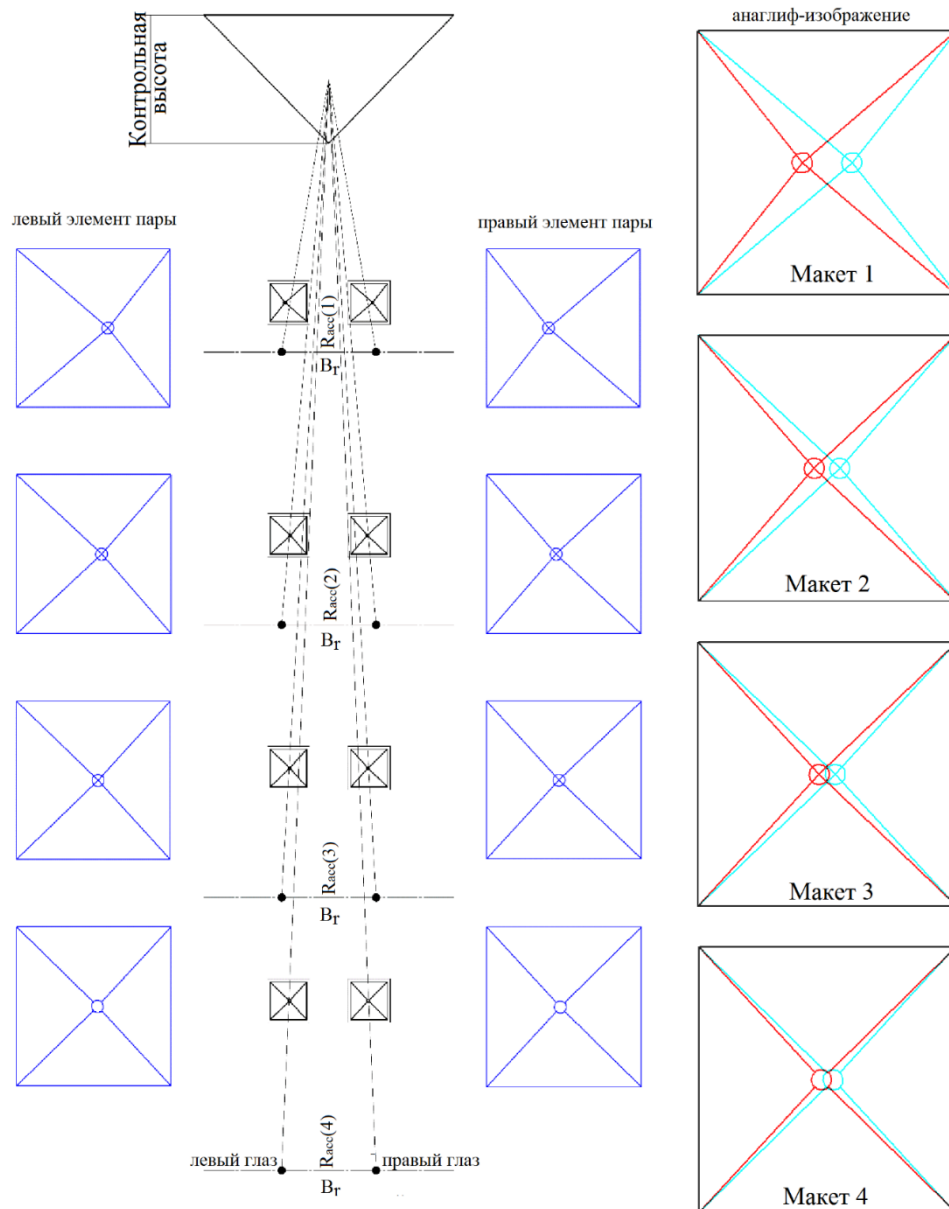


Рисунок 46. Формирование анализируемых пар изображений

Кроме расчета оптимального расстояния, необходимо учесть физиологические особенности бинокулярного зрения человека, а именно, величину угла конвергенции глазных осей (γ), глазной базис, расстояние от точки фиксации изображения глазом до VSI (R_{acc}), протяжённость объекта по глубине, фокусное расстояние глаза (17 мм), острота стереоскопического зрения [23, 46].

Примеры пары изображений для построения анаглифа приведённые ниже (рис. 47), были получены в CAD системе «Компас-3DLTV12» [25] со следующими параметрами: $R_{acc}=188$ мм, $B_r=65$ мм.

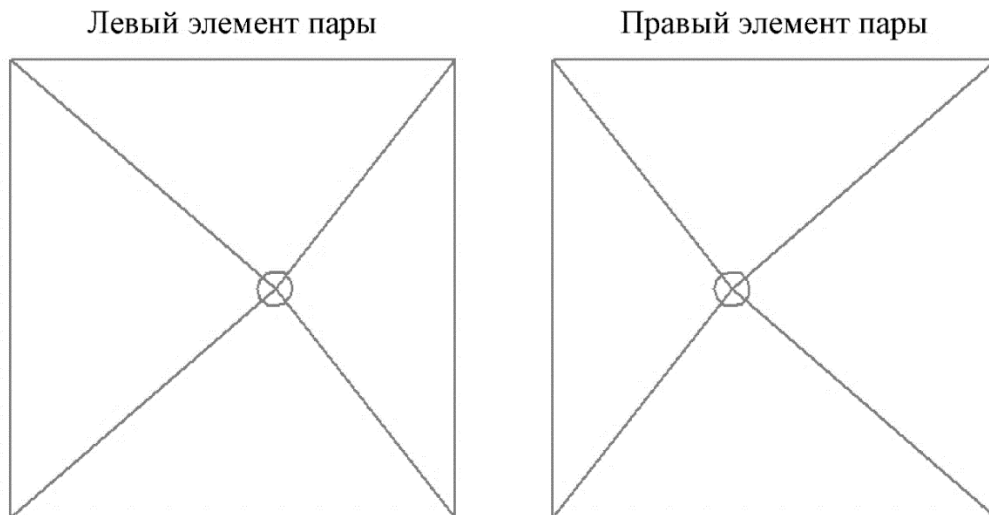


Рисунок 47. Пример пары элементов для построения изображения-анаглифа

Полученные изображения-анаглифы проверялись визуальным методом, а именно, измерительным прибором определялась высота пирамиды используя также четыре зрительных базиса (расстояние от оператора до визуализированного изображения-анаглифа). Результаты определений приведены в таблице 10.

Таблица 10. Параметры геометрических характеристик пирамиды

Расстояние от оператора до визуализированного изображения-анаглифа, мм	Измеренное значение высоты, мм			
	Макет 1	Макет 2	Макет 3	Макет 4
750	119	62	43	31
563	90	51	31	24
375	63	40	24	19
188	45	32	19	16

Контрольной величиной являлось истинное значение высоты пирамиды – 68 мм (при введении масштабного оптического коэффициента отображения на экране монитора – 34,8 мм). Визуальный анализ полученных результатов представлен на рисунке 48, где видна следующая зависимость: при увеличении расстояния от оператора до визуализированного изображения-анаглифа, увеличивается высотный коэффициент модели. При этом некоторые модели (макеты 2 и 3) при определённых условиях принимают высотный масштабный коэффициент 1:1, что способствует проведению измерений.

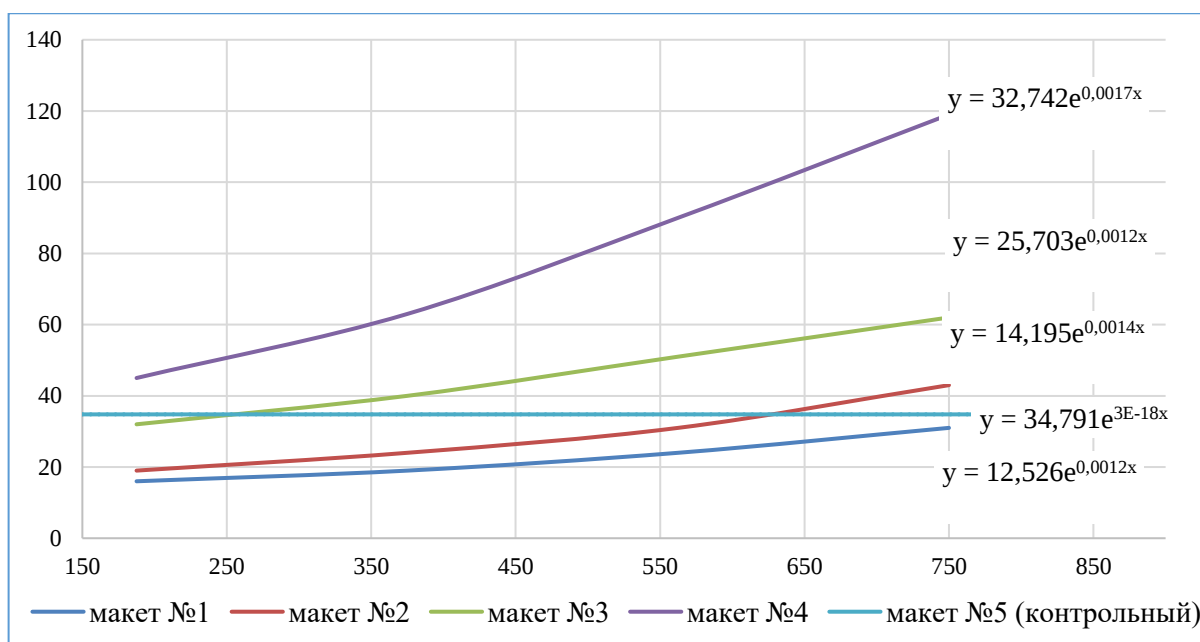


Рисунок 48. Гистограмма зависимости высотный коэффициент модели от расстояния от оператора до визуализированного изображения-анаглифа.

С учетом полученных значений, установлено, что оптимальное соотношение масштабов модели составляет 3,634, что соотносится с диапазоном оптимальных значений (от 3 до 4), установленных в работе Книжникова Ю. Ф. [22].

На основе эксперимента можно сделать вывод о наличии зависимости между высотным коэффициентом модели к расстоянию от оператора до визуализированного изображения-анаглифа. Применительно к ЦМР необходимо:

- использовать соотношение протяженности участка модели в плане по отношению к «высоте полета» как $\frac{1}{3,634}$, при условии, что размерность минимальной ячейки ЦМР составляет до 30 м в плане,

- расстояние от наблюдателя до изображения должно составлять не менее 650 мм,
- построение стереоизображений-анаглифов, для исследований пластики рельефа, следует осуществлять с применением синтеза цветов пикселей изображений в виде серого анаглифа,

- за базовое значение цветов сдвига принять C:94 M:2 Y:0 K:10 и C:0 M:87 Y:89 K:5 при цветном воспроизведении или C:100 M:0 Y:0 K:0 и C:0 M:100 Y:100 K:0 при «сером» воспроизведении.

Таким образом, использование стереоизображений (изображений-анаглифов) при анализе территории позволяет рассмотреть характеристики рельефа местности и территории в целом с субъективной точки зрения и выявить необходимые участки для более глубокого

анализа. При этом, предлагаемая процедура создания анаглифов (рис. 49) опирается только на данные, получаемые из открытых источников, и не требует финансовых вложений исследователей на этапе общего анализа территории. Кроме того, последующее преобразование цветов из аддитивной в субтрактивную цветовую модель для печати изображения в виде твердой копии, повысит восприятие за счет потери яркости, которая вызывает дополнительную нагрузку на зрение, за счет «свечения».

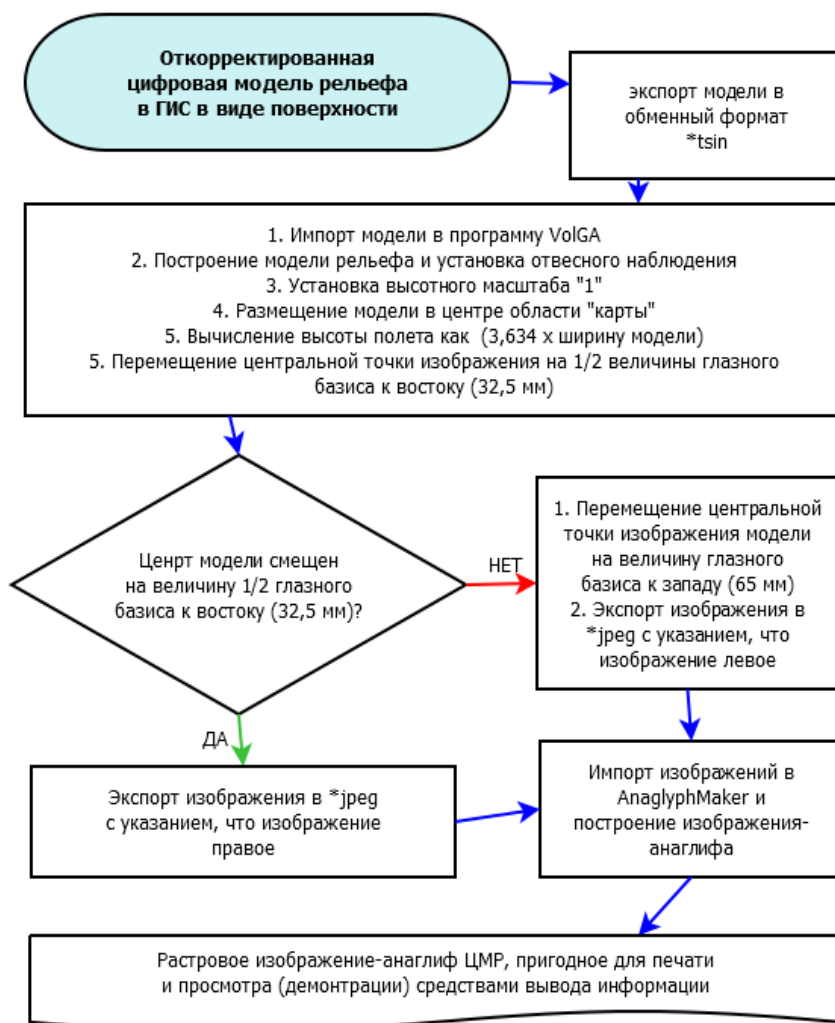


Рисунок 49. Предлагаемая процедура создания изображений-анаглифов

3.5.3. Создание стереоскопических изображений цифровых моделей местности

Учитывая полученные результаты, были построены изображения-анаглифы картографического содержания (рис. 50). «Непосредственной основой для составления изображений-анаглифов является «объёмная» модель, при этом она не обязательно должна

существовать материально, а может быть представлена в виде 3D модели, полученного с применением компьютерных технологий» [46, с. 14].

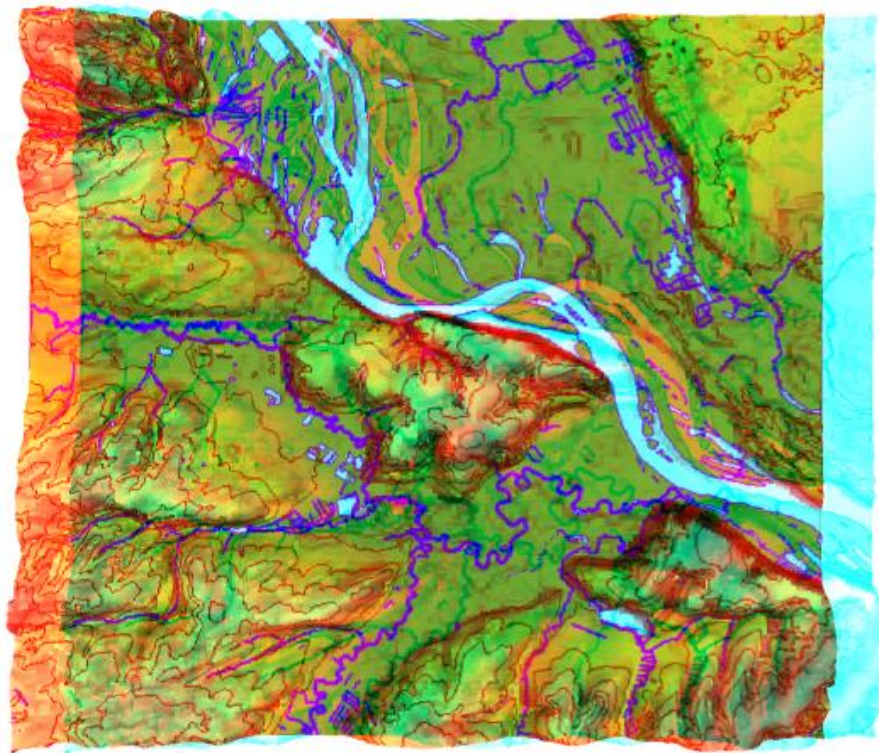


Рисунок 50. Пример изображения-анаглифа картографического содержания (вертикальный масштаб 1:10)

В виде объёмной модели выступала трёхмерная модель местности бассейна р. Кудьмы, визуализированная в ГИС и построенная на основе выровненных материалов дистанционного зондирования Земли. Процесс построения такой 3D модели требует использования целого ряда программных продуктов (3DEM, Quantum GIS, «3Dview») и методов обработки и корректуры данных [30]. Восстановленная цифровая модель рельефа, путем исключения растительного покрова, позволяет строить пространственные модели, отражающие пластику рельефа, и визуально обследовать морфологические структуры территории.

Для создания анаглиф-изображений, содержащих картографическую информацию, применяется операция оверлей. Изображения-анаглифы строились в двух видах: серый и оптимизированный (рис. 51). Глубина каждого изображения-анаглифа подбиралась с учетом масштабных коэффициентов и вертикальных датумов, т.к. от угла конвергенции глазных осей зависит протяжённость объекта по глубине (рис. 52).

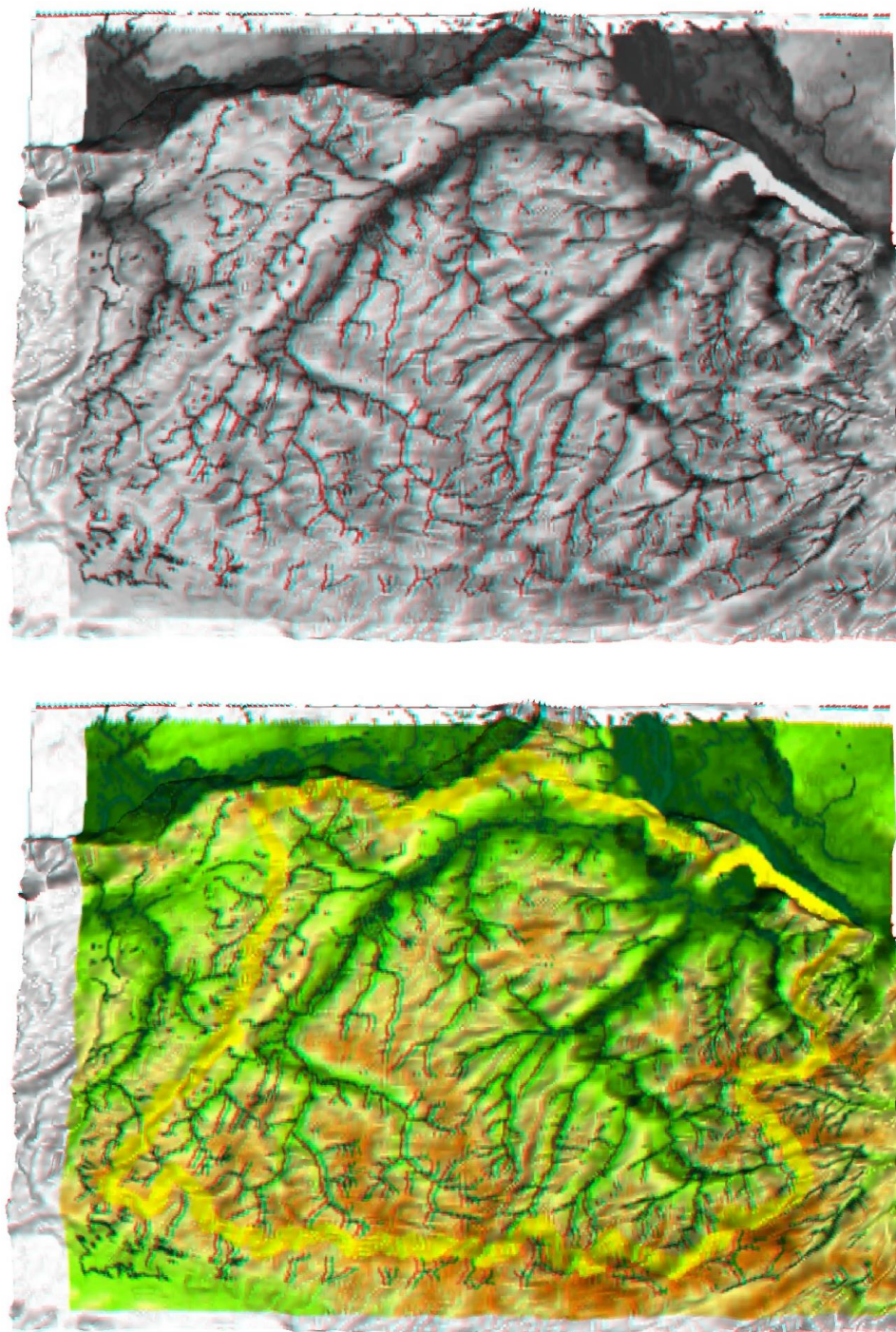


Рисунок 51. Пример изображений-анаглифов картографического содержания (данные дистанционного зондирования Земли) в двух вариантах: верхнее – серый анаглиф, нижнее – цветной анаглиф, построенные по принципу цветового смещения «Красный-Голубой»

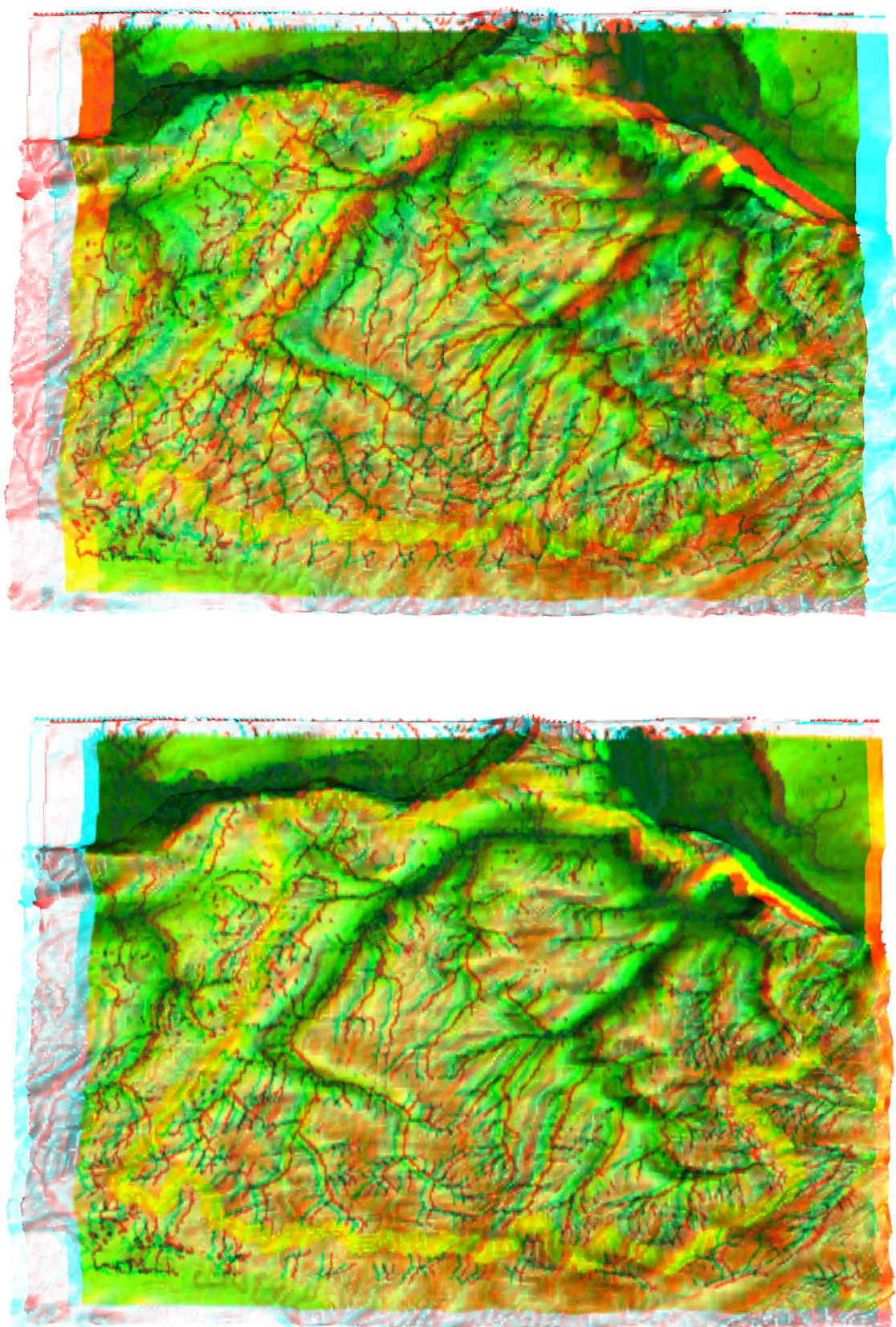


Рисунок 52. Примеры глубин изображений-анаглифов картографического содержания: верхний – положительный (строится перед картинной плоскостью); нижний – отрицательный (строится за картинной плоскостью). Под картинной плоскостью будет пониматься монитор компьютера или неэлектронный носитель, на котором нанесено изображение

Данный способ создания изображений-анаглифов направлен на максимальное использование общедоступной информации.

Применение подобных материалов для анализа территорий (объектов) имеет большие преимущества по сравнению с двумерными изображениями, за счёт стереоскопического эффекта и большей наглядности [46].

Разработанный подход создания изображений-анаглифов может быть использован в картографировании, как один из способов визуализации картографических произведений с возможностью частичного погружения исследователя в среду [29].

3.6. Выводы по главе

Проведенные в рамках диссертационной работы исследования позволили разработать методы коррекции и восстановления данных поверхностей рельефа, за счёт исключения влияния лесных массивов. Каждый из предложенных методов позволяет повысить количественные показатели моделей рельефа, напрямую зависящие от залесённости территории и наличия пунктов с исходными высотами. Предлагаемый метод показывает результаты лучше других при использовании кругового распределения коэффициентов, при применении размерности окна $D=1$ или $D=2$ и степени «2».

Предлагаемый порядок обработки данных позволяет классифицировать оцениваемые участки по наличию растительности, а получаемые численные показатели используются в дальнейшем для исследований закономерностей распределения погрешностей и корректуры модели рельефа средствами ГИС.

Разработанный метод корректуры цифровой модели рельефа с применением коэффициентов интерполяционного полинома Лагранжа и весовой функции средствами ГИС позволяет повысить высотные характеристики. Метод состоит из двух основных позиций: глобальная корректура участков, не занятых лесной растительностью с использованием в качестве эталонов пункты государственной геодезической сети; локальная интерполяция (сглаживание) участков территории, занятых лесной растительностью с использованием буферизации территорий и сведений индекса NDVI.

В связи с ограниченной возможностью трёхмерной визуализации данных в открытом ПО, выровненная DEM в трёхмерном виде в диссертационной работе строилась в программе VolGA, специально разработанной для целей трёхмерного моделирования рельефа местности, его визуализации, а также решения аналитических геоинформационных

задач. Использование подобных матриц может заменить традиционные методы работ в целом ряде гидрологических, геоморфологических, экологических и т.д. исследований, причём, с экономической точки зрения, данный метод подготовки DEM выгоден и имеет качественные результаты [44].

Предложенная процедура построения изображений-анаглифов позволяет сформировать твердые копии стереоизображений-анаглифов ЦМР, обеспечивающие возможность адекватного и достоверного определения высотных параметров элементов изображения для решения аналитических инженерных задач. Ограничение использования таких стереоизображений – расстояние от наблюдателя до изображения должно составлять не менее 650 мм. Изображения-анаглифы могут использоваться как источники для наглядного определения элементов пластики рельефа местности (впадины, хребты, их сочленения и т.д.), для визуального уточнения границы речных бассейнов (в том числе водосборных площадей), для составления проектов внутрихозяйственного землеустройства и т.д. Составление подобных изображений-анаглифов картографического содержания возможно, только при использовании цифровой модели рельефа, оперативно которую можно получить, используя предлагаемые автором методы. Учитывая зависимости между высотным коэффициентом модели к расстоянию от оператора до визуализированного стереоизображения-анаглифа, применительно к ЦМР, необходимо использовать соотношение $1/3,634$. Учитывая, что в изображениях при использовании драпировок применяются «естественные» цвета (зеленый, синий), а главной целью цифровых моделей рельефа является передача пластики рельефа, то предлагается использовать серый анаглиф.

ГЛАВА 4. РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ НА БАЗЕ ПРИВЕДЁННЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА В БАСЕЙНОВЫХ ГИС

4.1. Определение основных морфометрических характеристик бассейна реки (на примере реки Кудьма Нижегородской области)

Для проведения экспериментальных исследований была выбрана ранее разработанная бассейновая ГИС – «ГИС-Кудьма» [30, 38, 40]. «ГИС-Кудьма» разработана в 2013 году на кафедре геоинформатики и кадастра. Для её реализации использовались открытые исходные материалы, которые ежегодно дополняются: цифровые топографические карты масштаба 1 : 25 000 (ГГЦ и Атлас ЕГС том 5-2004 (2008) страница р5-26-2), масштаба 1 : 50 000 (ГГЦ и РККА); геологические карты РФ масштаба 1 : 1 000 000 (ВСЕГЕИ); космические снимки, в том числе, из «SAS.Планета» (бесплатно распространяемой навигационной программы, объединяющей в себе возможность загрузки и просмотра карт и спутниковых фотографий земной поверхности большого количества картографических online-сервисов; распространяется на условиях GNU General Public License) [162]; данные дистанционного зондирования земли (дополнения 2016-2018 годов) со спутников, подведомственных NASA и полученные с их помощью цифровые матрицы высот, доступные в открытом пользовании [10]; статистическая информация из печатных источников по блокам: недра, земная поверхность, гидрология, биоразнообразие, аэротория. Сведения о системе «ГИС-Кудьма» приведены в приложении А.

Множественность морфометрических показателей форм земной поверхности не даёт возможности проводить оценку территории с учетом комплексного подхода, в связи с чем возникает необходимость выразить всю сложность топографических форм, одной количественной оценкой или морфометрической характеристикой (средняя высота, средний угол наклона, площадь топографической поверхности и объём, изрезанность очертаний, расчленённость и извилистость, густота и т.д.). Такие характеристики тесно связаны с геометрическими особенностями физической поверхности рельефа.

Определение частных морфометрических характеристик осуществляется на базе цифровых моделей рельефа, максимально возможного разрешений, имеющих на данный момент времени на данную территорию. Для проведения сравнения усовершенствованной (откорректированной) и сырой модели рельефа, за эталонное значение принято использовать материалы топографических карт. Контрольные высотные значения

собираются из архивных материалов организаций, выполняющих геодезические и картографические работы, в том числе, на исследуемой территории (УНПЦ «Кадастр» ННГАСУ, ООО «Аэрогеодезия») и постоянно добавляются в «ГИС-Кудьма». Для сравнения использовались возможности открытых систем QGIS и GRASS. Результаты определения морфометрических показателей бассейна реки Кудьмы приведены ниже.

4.1.1 Средняя высота

Для определения средней взвешенной высоты бассейна (СВБ) в картометрии наиболее распространён метод, который учитывает площади поверхностей ЦМР расположенные между двумя смежными изолиниями кратных высот, при этом площадь как математическое значение выступает в роли весовой функции:

$$[H] = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (29)$$

где $[H]$ - средневзвешенное значение высоты водосборной площади, $\sum_{i=1}^n (H_i P_i)$ - сумма произведений частных площадей, заключённых между смежными изолиниями ратных высот (высота на данной площади определяется как среднее арифметическое значение между двумя изолиниями), $\sum_{i=1}^n P_i$ - суммарная площадь участков водосбора заключённых между изолиниями смежных высот, которая приравнивается к значению общей площади водосбора.

Значения площадей и отметок получены с использованием модулей «SAGA-GIS Module Hypsometry» [93] и «Hypsometric curves» [154]. Дополнительно проведена группировка данных, необходимая в дальнейшем, для расчёта и построения гипсометрической кривой бассейна. Использование модуля «Raster layer statistics» [154] позволило оперативно определить среднюю величину СВБ, которая составила 137,98 м. Контрольная величина СВБ определялась «классическим» методом двумя способами: первый включал в себя обработку 268760 элементарных единиц площади (в среднем 1 га), выявленных на поверхности для данной территории, второй заключался в разбиении всей территории на участки с одинаковой средней высотой (между двумя смежными горизонталями), площадь которых нетрудно определить картометрическим методом – оба

варианта дали одинаковый результат в 137,6 м. В таблице 11 приведены вычисленные значения СВБ различными способами.

Таблица 11 – Ведомость сравнения величины средней высоты бассейна водного объекта, определённые различными способами.

Применяемый метод	Характеристики		Результат, м
	Значение весовой функции	Значение учитываемой площади территории	
Автоматизированный метод			
Стандартный модуль ГИС для выровненной модели	$444069,4 \times 10^6$	$3218,4 \times 10^6$	138,0
Стандартный модуль ГИС для «сырой» модели	$462888,6 \times 10^6$	$3231,4 \times 10^6$	143,2
Классический картометрический метод			
по элементарным отрезкам	$437943,9 \times 10^6$	$3182,7 \times 10^6$	137,6
по мнимым площадям	$437985,8 \times 10^6$	$3183,0 \times 10^6$	137,6

Как видно из таблицы, наиболее близким к результатам классического метода подходит значение СВБ, полученное с использованием стандартного модуля ГИС.

При этом, СВБ, определяемая по «сырой» модели на выбранную территорию с использованием стандартного модуля ГИС, соответствует величине в 143,2 м и отличается на 4% от условно истинного (картометрического) значения. Величина, полученная с использованием «сырой» модели, имеет более высокое значение в связи с тем, что часть территории имеет покрытие лесной растительностью и представляет собой не ЦМР, а больше подходит под определение ЦММ.

4.1.2 Средний угол наклона

Способов определения среднего угла наклона (СУН) топографической поверхности существует довольно много, однако в общем случае данное определение звучит следующим образом: тангенс среднего угла наклона поверхности ($\tan A$) равен отношению суммы вертикальных площадей ($h^c \times \sum_{i=1}^n l_i$) к сумме горизонтальных площадей ступеней ступенчатой модели ($\sum_{i=1}^n P_i$) [137]:

$$\tan A = \frac{h^c \times \sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \rightarrow A = \tan^{-1} \left(\frac{5 \times 25265,2 \times 10^3}{3,223 \times 10^9} \right) = 2^\circ 14' \quad (30)$$

Данная величина показывает основную характеристику топографической поверхности, используемой при определении дальнейших объёмов биологических, водных и других ресурсов территорий.

Суммарная длина горизонталей взята в соответствии с высотой сечения рельефа $h^c = 5$. При увеличении высоты сечения в два раза (до 10 м) показатель среднего угла наклона изменяется на незначительную величину в $15''$. В случае использования «сырой» модели средний угол наклона изменяется на 24% и составляет $3^\circ 16''$. Также, как и с показателем СББ, средний угол наклона сильно меняет свое значение, причем в большую сторону, в связи с наличием лесной растительности, которая на своих границах создает резкие перепады высот от нескольких метров до десятков метров на малых расстояниях (от 1 до 2 наименьших единиц раstra модели).

4.1.3 Вычисление площади топографической поверхности и объёмов

В сущности, переход от картографических проекционных площадей, полученных на поверхностях относимости к площадям физической (топографической) поверхности (Ф(т)П), осуществляется путём введения поправок за наклон поверхности к горизонту и за высоту над поверхностью относимости. Учитывая, что Ф(т)П состоит из бесконечно большого числа малых форм ($P_i^{\text{прj}}$) расположенных относительно друг друга под разными углами (A_i) и на разных высотах (H_i), площадь Ф(т)П будет определяться как сумма площадей составляющих её элементов:

$$P = \sum_{i=1}^n \left[P_i^{\text{прj}} \left(1 + \frac{2H_i}{R} \right) \sec A_i \right] \approx P^{\text{прj}} \left(1 + \frac{2[H]}{R} \right) \sec A = 3231,3 \times 10^6 \quad (31)$$

Несмотря на прямую зависимость данной характеристики от величины угла наклона топографической поверхности, при использовании «сырых» данных, площадь топографической поверхности определяется как 3233,5 кв. км, которая отличается от условно истинного значения менее чем на 0,1%.

Таким образом, при рассмотрении территорий большой площадью данная морфометрическая характеристика может определяться на основе «сырых» данных, причём, для расчёта так же можно использовать СУН, полученный из той же самой DEM, представленной в виде растровой модели данных.

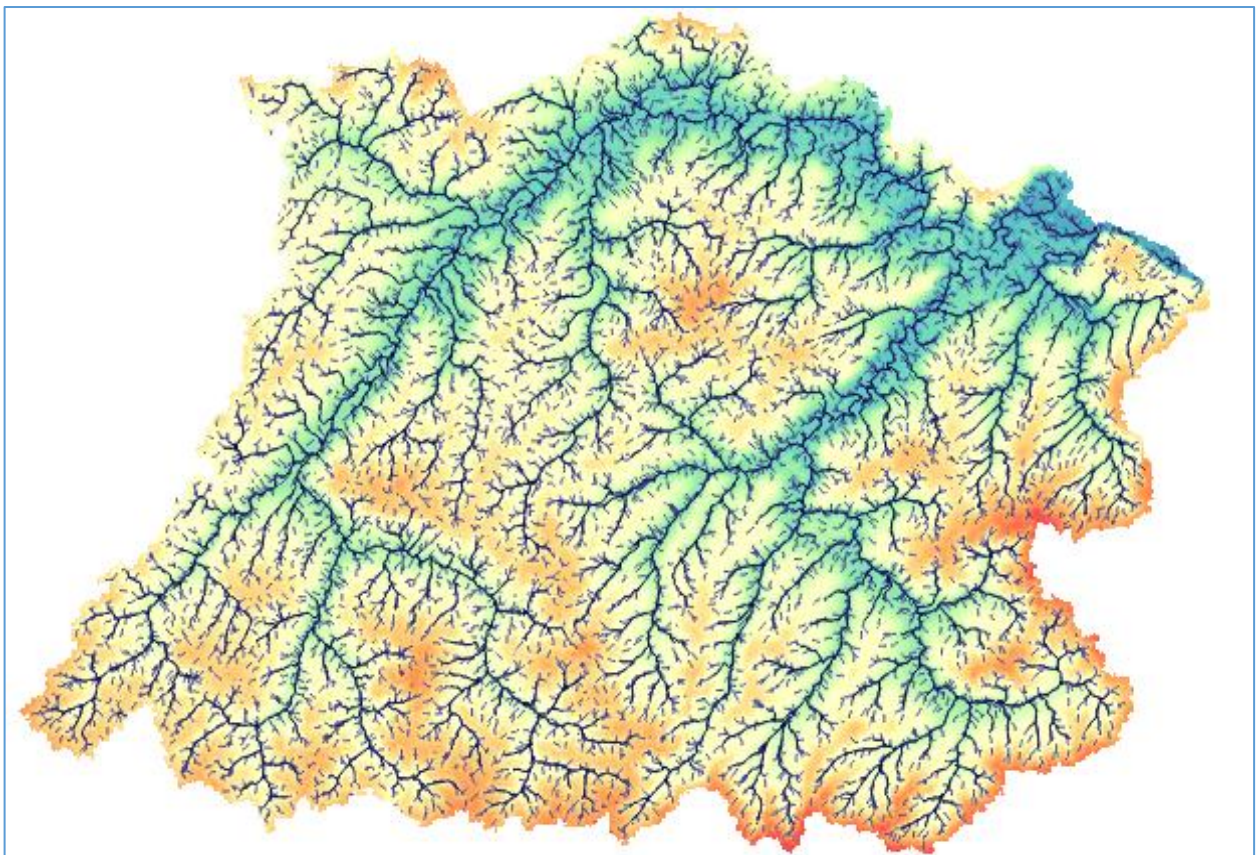
4.1.4 Изрезанность очертаний, расчленённость и извилистость

Числовые показатели членения рельефа в пространственном отношении можно подразделить на две основные группы: горизонтальное и вертикальное.

Горизонтальное расчленение рельефа характеризуется длиной гидрографической (эрозионной) сети ($\sum_{i=1}^n l_i$) на квадратный километр площади (P). Коэффициент расчленённости территории, напрямую зависит от протяжённости эрозионной сети (сети тальвегов) и определяется по формуле:

$$k_l = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{P} \quad (32)$$

Имея качественную модель рельефа в автоматизированном режиме с использованием модуля «r.watershed» [89] были определены положения отрицательных орографических линий рельефа бассейна (рис. 53).



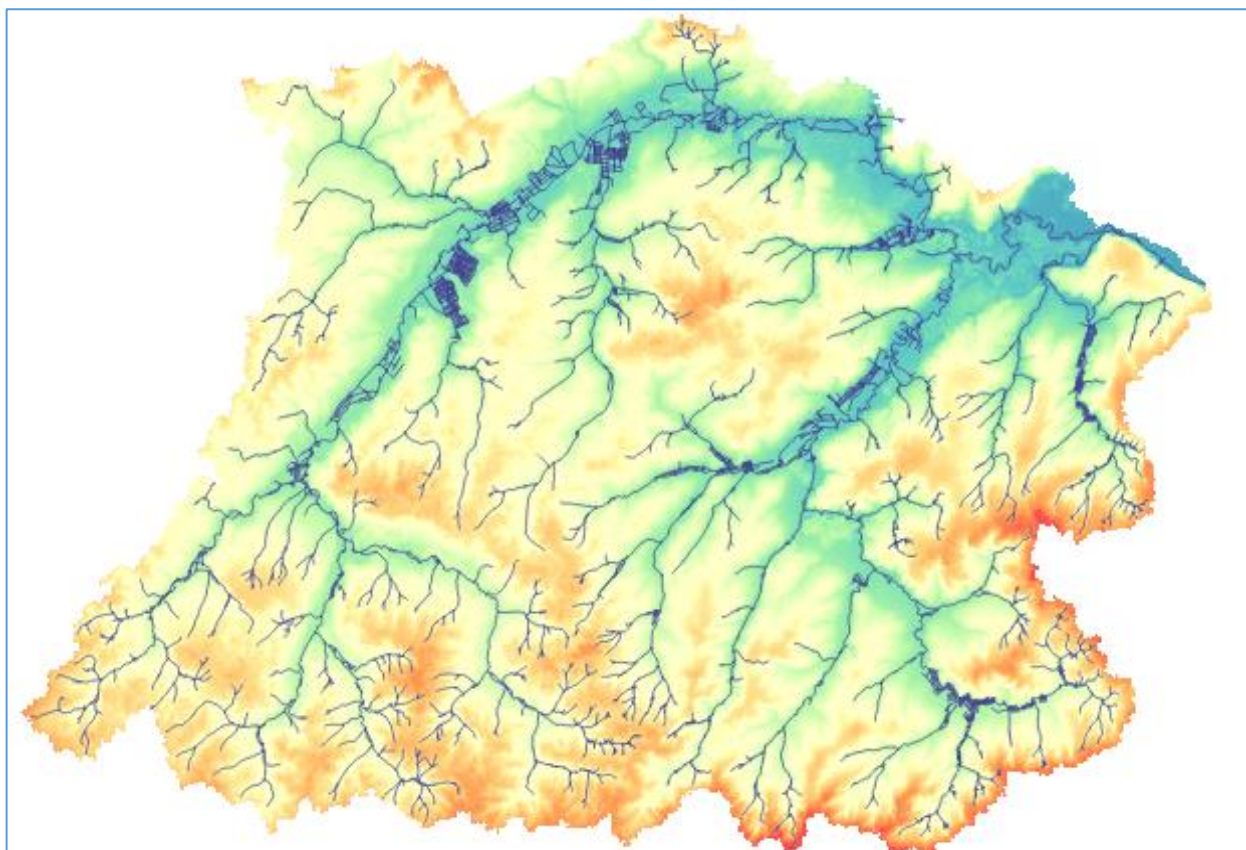


Рисунок 53. Эрозионная сеть бассейна реки Кудьма: верхнее – данные, полученные с использованием автоматизированного метода обработки изображений, нижнее – сеть действующих водотоков по данным геодезических изысканий и отображаемая на топографических картах масштаба 1:25000

В сравнение с автоматизированными методами, в работе используются данные ранее выполненных работ [27, 28] по гидрографированию территории бассейна (табл. 12).

Таблица 12 – Вычисление коэффициента горизонтальной расчленённости

Характеристика	По сведениям «ГИС-Кудьма»	По автоматическому определению	
		Средняя площадь частного водосбора более 5 кв. км.	Средняя площадь частного водосбора менее 1 кв. км.
Суммарная длина водотоков бассейна	2222,7	1176,3	3232,6
Площадь водосбора	3228,1	3230,7	
Коэффициент	0,69	0,36	1,00

При использовании условия необходимости использования площади частного водосбора в 2,2 кв. км. коэффициент с ранее определёнными параметрами «сырой» SRTM получился равным 0,56 и составит разницу менее 20% от условно истинного значения.

Степень вертикального расчленения территории характеризуется глубиной расчленения рельефа. Этот показатель определяется как разность значений крайних

абсолютных высот по каждому частному водосбору. Коэффициент рассчитывался по различным средним площадям водосборов (менее 1 кв. км. (5574 частных водосбора), не менее 5 кв. км. (564 частных водосбора) и на всю территорию бассейна):

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^{5574} (\Delta H_i P_i)}{\sum_{i=1}^{5574} P_i} = \frac{159559,9}{3230,7} = 49,82$$

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^{564} (\Delta H_i P_i)}{\sum_{i=1}^{564} P_i} = \frac{271042,4}{3230,7} = 85,07$$

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^1 (\Delta H_i P_i)}{\sum_{i=1}^1 P_i} = \frac{623460,5}{3230,7} = 192,98$$

Ниже на графике (рис. 54) приведена зависимость изменения коэффициента степени расчленения территории бассейна от площади анализируемого частного водосбора. При использовании «сырых» значений при количестве частных водосборов 564 степень ВР составит 76,53 (10% от условно истинного значения).

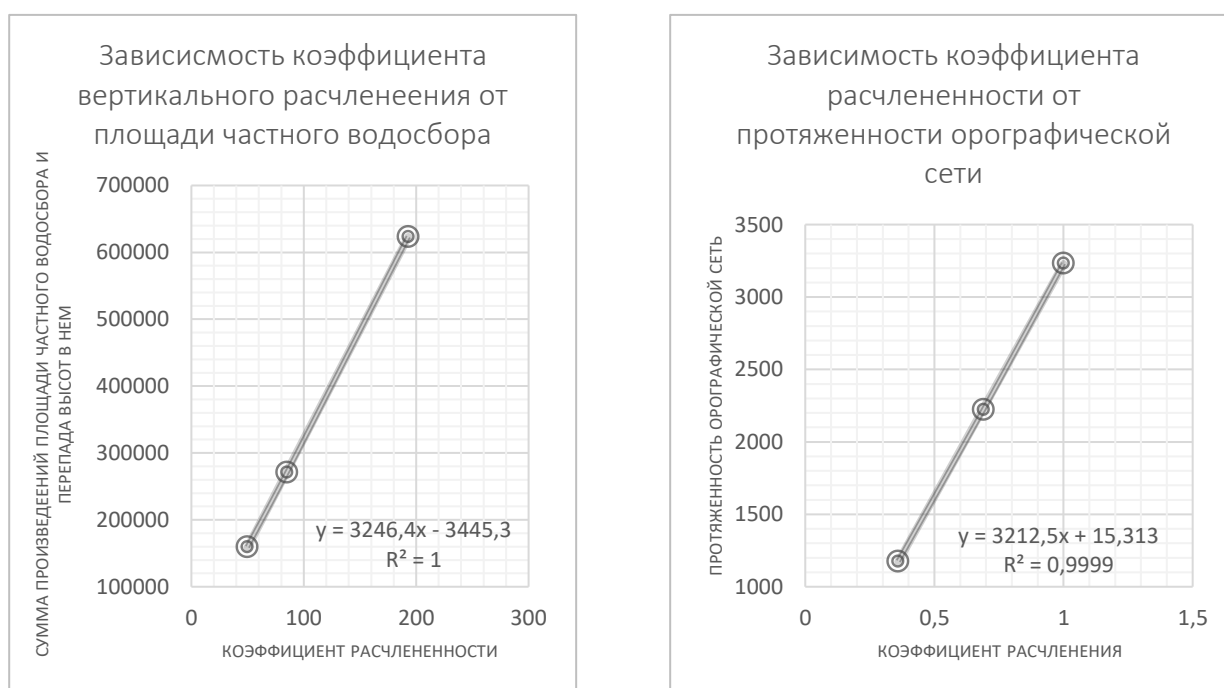


Рисунок 54. Графики зависимости коэффициентов расчленения при изменении объёмов величин, входящих в расчёт

При этом ранее полученные полигональные области позволили выявить в них пиксели с максимальной и минимальной отметкой и их разность. С целью приведения значения вертикальной расчленённости рельефа предлагается перейти от непосредственного значения глубины расчленения к коэффициенту вертикального расчленения путём введения следующего соотношения:

$$k_{vp} = \frac{H_{vp}}{H_{vp}^1} \rightarrow \begin{cases} \text{при } n = 5574, k_{vp} = 0.26 \\ \text{при } n = 564, k_{vp} = 0.44 \\ \text{при } n = 1, k_{vp} = 1.00 \end{cases}$$

При использовании «сырых» значений степень ВР составит 76,53 (10% от условно истинного значения) или 0,40 в относительных единицах. Коэффициент извилистости принято считать, как отношение площади объекта, покрытого гидрологической сетью к общей протяжённости сети:

$$k_r = \frac{P}{\sum_{i=1}^n l_i} \rightarrow \begin{cases} k_{r1} = \frac{3230,7}{3232,6} = 1,0 \\ k_{r2} = \frac{3228,1}{2222,7} = 1,4 \\ k_{r3} = \frac{3230,7}{1176,3} = 2,7 \end{cases}$$

Вычисления данного коэффициента выполнялось при различных условиях определения протяжённости орографических составляющих (разная площадь бассейнов). При использовании данных «сырой» SRTM коэффициент извилистости составит 1,7 (несколько более 20% от условно истинного значения), при условии использования среднего значения площади частного водосбора в 22 кв. км. для приведения значений к действительным (данная площадь частного водосбора обусловлена картографической величиной суммарной протяжённости действующим водотокам, описанным ранее).

Ниже, на графике (рис. 55) приведена зависимость изменения коэффициента степени расчленения территории бассейна от площадей анализируемых частных водосборов. Где видно, что при изменении площади рассматриваемой минимальной территориальной единицы коэффициент расчленённости сильно изменяется в границах своих предельных значениях, а минимальные достаточные значения площади находятся в интервале от 20 до 30 кв. км. для рассматриваемого водосбора.

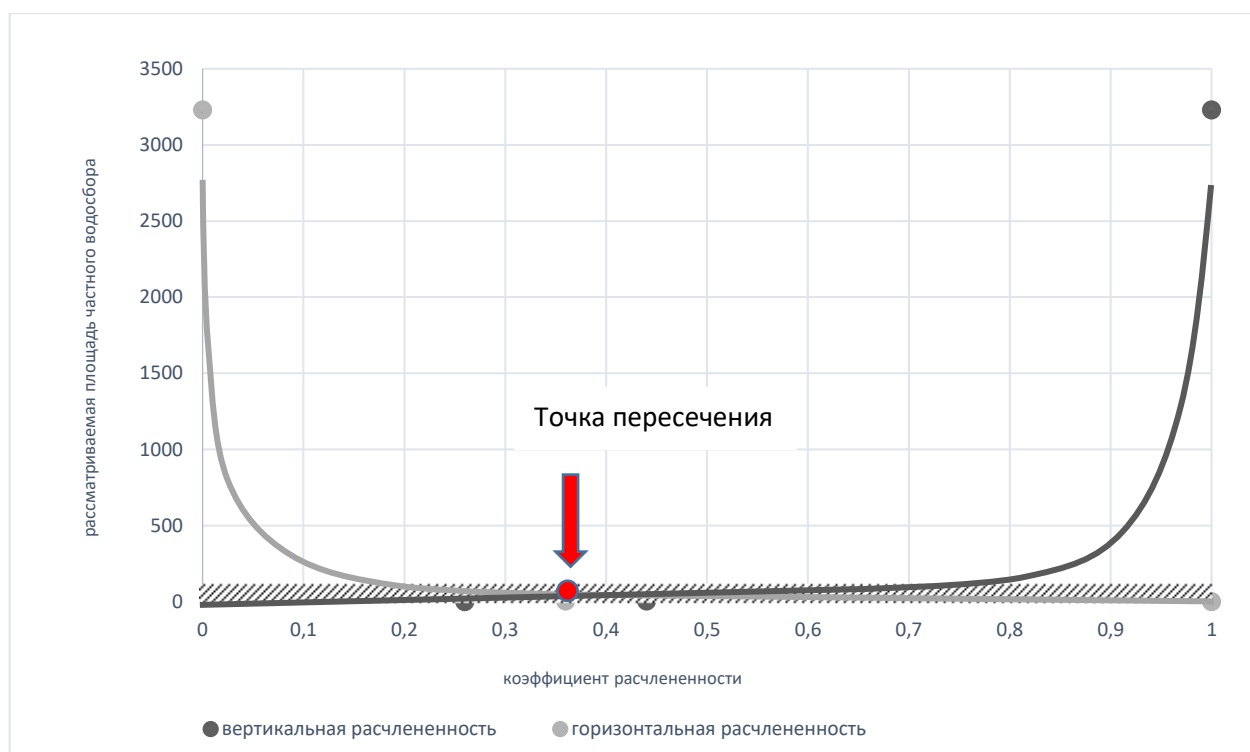


Рисунок 55. Зависимости коэффициентов расчленения при изменении расчётных величин

В таблице 13 указаны основные характеристики речного расчленения частных водосборов (**F** – площадь частного водосбора, км², **L** – суммарная протяжённость водных объектов внутри частного водосбора, км, **K** – густота речной сети частного водосбора км/км²).

Таблица 13 – Основные характеристики речного расчленения частных водосборов бассейна реки Кудьма.

Река, частный водосбор	F	L	K
р.Кудьма, от истока до устья р. Пава	99,3	99,1	1,00
р. Пава, от истока до устья	87,3	58,6	0,67
р.Кудьма, от устья р.Пава до устья р.Сетчуга	43,1	29,5	0,68
р.Сетчуга, от истока до устья	270,1	165,9	0,61
р.Кудьма, от устья р.Сетчуга до устья р.Шилекша	42,2	46,9	1,11
р.Шилекша, от истока до устья	177,1	121,7	0,69
р.Кудьма, от устья р.Шилекша до устья руч.Чижково	119	79,4	0,67
руч.Чижково, от истока до устья	92,5	56,2	0,61
р.Кудьма, от устья руч.Чижково до устья р.Березовка	69,7	105	1,51
р.Березовка, от истока до устья	217	111,4	0,51
р.Кудьма, от устья р.Березовка до устья р.Ункор	74,8	59,8	0,80
р.Ункор, от истока до устья	258,2	177,2	0,69
р.Кудьма, от устья р.Ункор до устья р.Шелокшонка	221,7	164,5	0,74

Река, частный водосбор	F	L	K
р.Шелокшонка, от истока до устья	88,5	54	0,61
р.Кудьма, от устья р.Шелокшонка до устья р.Озерка	23	10,9	0,47
р.Озерка, от истока до устья р.Опракса	85,5	74,6	0,87
р.Опракса, от истока до устья	43,2	39,8	0,92
р.Озерка, от устья р.Опракса до устья р.Пичинка	2,3	8,3	3,61
р.Пичинка, от истока до устья	53,5	23	0,43
р.Озерка, от устья р.Пичика до устья р.Относ	43,3	33,9	0,78
р.Относ, от истока до устья	61,2	27,7	0,45
р.Озерка, от устья р.Относ до устья р.Шемлей	19,9	10,1	0,51
р.Шемлей, от истока до устья	119,3	54,2	0,45
р.Озерка, от устья р.Шемлей до устья р.Печеть	73,5	37,8	0,51
р.Печеть, от истока до устья	96	41,5	0,43
р.Озерка, от устья р.Печеть до устья р.Пукстерь	24	13,5	0,56
р.Пукстерь, от истока до устья р.Модан	108	81,9	0,76
р.Модан, от истока до устья	45,7	25,8	0,56
р.Пукстерь, от устья р.Модан до устья р.Тутеевка	1	3,4	3,40
р.Тутеевка, от истока до устья	75,6	33,2	0,44
р.Пукстерь, от устья р.Тутеевка до устья	46,7	35	0,75
р.Пукстерь, от истока до устья	227	179,4	0,79
р.Озерка, от устья р.Пукстерь до устья	142,3	117,9	0,83
р.Озерка, от истока до устья	1040,9	661,2	0,64
р.Кудьма, от устья р.Озерка до истока р.Шава (Шавка)	54,2	26,6	0,49
р.Шава (Шавка), от истока до устья	232,6	183,7	0,79
р.Кудьма, от устья р.Шава(Шавка до устья	16,8	9,6	0,57
р.Кудьма, от истока до устья	3228,1	2222,7	0,69

Как видно из результатов, определение морфометрических показателей, определяемых по цифровой модели рельефа, точность и достоверность которых повышена с использованием методов, разработанных автором, в ряде случаев соответствует результатам, получаемым по топографическим картам, натурным обследованиям и существующей изученности.

В таблице 14 приведены показатели бассейна водного объекта, определенные по двум моделям рельефа.

Таблица 14 – Сводная таблица морфометрических показателей.

Показатель	Значение		Отклонение , %
	Выровненная модель	Исходная «сырая» модель	
Средняя высота бассейна	138,0 м	143,2 м	4%
Средний угол наклона	2°14''	3°16''	24%
Площадь топографической поверхности	3231,3 кв.км	3233,5 кв.км	<1%
Коэффициент горизонтальной расчлененности	0,69	0,56	20%
Коэффициент вертикального расчленения	0,44	0,40	10%
Коэффициент извилистости	1,4	1,7	20%

Для проведения автоматизированной обработки цифровой модели рельефа бассейна средней реки с высоким процентом достоверности необходимо проводить анализы на частных водосборах площадью от 0,6 до 0,8% от общей площади территории бассейна. Данный вывод подтверждается и в существующих методических подходах к исследованию речных бассейнов [7, 53, 86]; где анализ проводится при расчленении территории на частные водосборы средней площадью в 0,7% от общей площади бассейна водного объекта. Использование необходимого и достаточного значения площади рассматриваемых частных водосборов позволит стандартизировать входные данные и определять численные морфометрические показатели бассейнов водных объектов с максимальной достоверностью, а использование открытых и откорректированных цифровых данных и свободно распространяемых ГИС, безусловно, удешевить и ускорить процессы исследований в рамках бассейнового подхода рационального природопользования и тематического картографирования бассейнов рек [33, 34].

4.2. Построение гидрографической сети

Вопросы исследования состояния водных объектов поднимаются все чаще из-за возрастающей необходимости рационального использования природных ресурсов. Для решения различного рода прикладных задач, для оценки и рационального использования водных ресурсов, для мониторинга экологического состояния речных бассейнов в целях устойчивого развития территорий необходимо иметь достаточно полные сведения о гидрологических характеристиках и режиме водных объектов. Особо ценными данными при развитии территорий в бассейнах водных объектов являются физико-географическое и гидрографические характеристики.

Использование геоинформационных систем позволяет максимально точно выявить искомые характеристики объектов местности (водных объектов), спланировать их использование и спрогнозировать развитие. Выполнение анализа существующей (современной) гидрографической сети бассейна реки Кудьма Нижегородской области с использованием геоинформационных систем выполнено с учетом требований, приведенных в приложении Д.

В работе для определения границы бассейна реки были использованы данные спутниковой радиолокационной съёмки Земли [110, 120]. Построенная ЦМР была использована для автоматизированного определения линий стоков в бассейне и границ самого бассейна реки с использованием модулей GRASS GIS [140] в ГИС QGIS [151] с последующим экспортом полученных результатов в обменный формат MIF для обработки в ГИС MapInfo Professional или ГИС «Аксиома».

Учитывая, что наименьшая ошибка в определении площадей получается при использовании равновеликих картографических проекций [68, 145], то векторные данные были переведены в равновеликую азимутальную проекцию Ламберта и, для сравнения, в региональную равноплощадную проекцию (Европейская часть) и Универсальной поперечной проекции Меркатора (UTM). Результаты сравнения площадей в различных проекциях представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Определение площади бассейна реки Кудьма.

Проекция	Площадь	
	км ²	га
Универсальная поперечная проекция Меркатора (зона 38)	3228,1	322810,82
Региональная равноплощадная проекция (Европа)	3228,1	322810,88
Равновеликая азимутальная проекция Ламберта	3228,1	322810,89

Как видно из сравнения, отклонения в определении площадей минимальны и дальнейшие определения будут проводиться в «привычной глазу» универсальной поперечной проекции Меркатора (рис. 56).

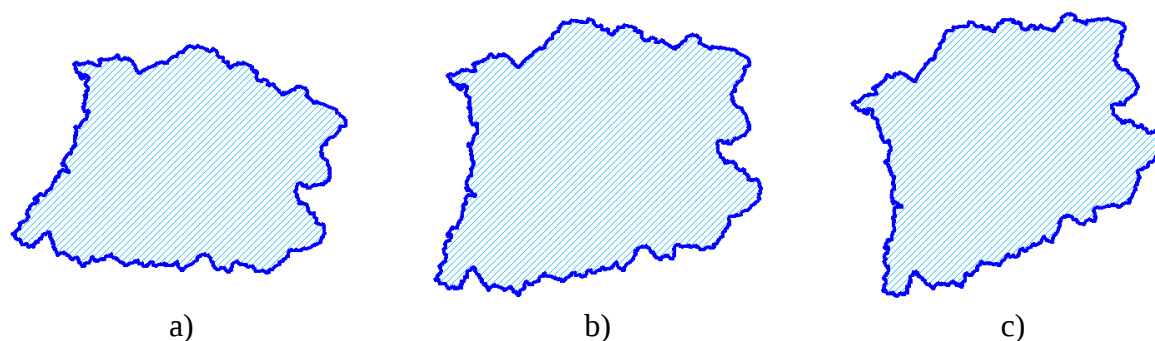


Рисунок 56. Изменение формы бассейна реки Кудьма при перепроецировании: а – Универсальная проекция Меркатора (зона 38), б–Региональная равноплощадная проекция (Европа), с– Равновеликая азимутальная проекция Ламберта.

Учитывая вышеописанное, использование проекции UTM (зона 38), способствует качественному определению протяженностей водных объектов, так как сохраняются линейные масштабы. Для построения речной сети использовались данные «ГИС Кудьма» [38, 40], полученные с цифровых карт путём полуавтоматической векторизации.

Используя ряд тематических запросов из «ГИС Кудьма» был получен ряд основных гидрографических характеристик бассейна (табл. 16).

Таблица 16 – Основные гидрографические характеристики бассейна реки Кудьма

Характеристика	Величина	Характеристика	Величина
Площадь водосбора, км ² , в том числе:	3228,1	Длина основного водотока, км	159,6
правая составляющая, км ²	2326,6	Длина водотоков, км,	2222,7
левая составляющая, км ²	901,5	в том числе:	
Коэффициент асимметрии	0,4	более 5 км, км	683,5
Периметр водосбора, км	460,6	от 5 до 10 км, км	284,0
Коэф. вытянутости водосбора	1,8	менее 5 км, км	723,5
Коэф. формы водосбора	0,6	каналов, км	531,7
		Густота речной сети, км/км ²	0,7

В ГИС, также были построены линейные модели водотоков бассейна, чья протяжённость превышала 5 и 10 км, с учётом прохождения русла водного объекта через каналы, пруды, водохранилища или озера (рис. 57) – всего 21 (при условии, что водных объектов с протяжённость более 5 км в бассейне реки не менее 59). По обеим моделям было определено число Страллера – 4 [171].

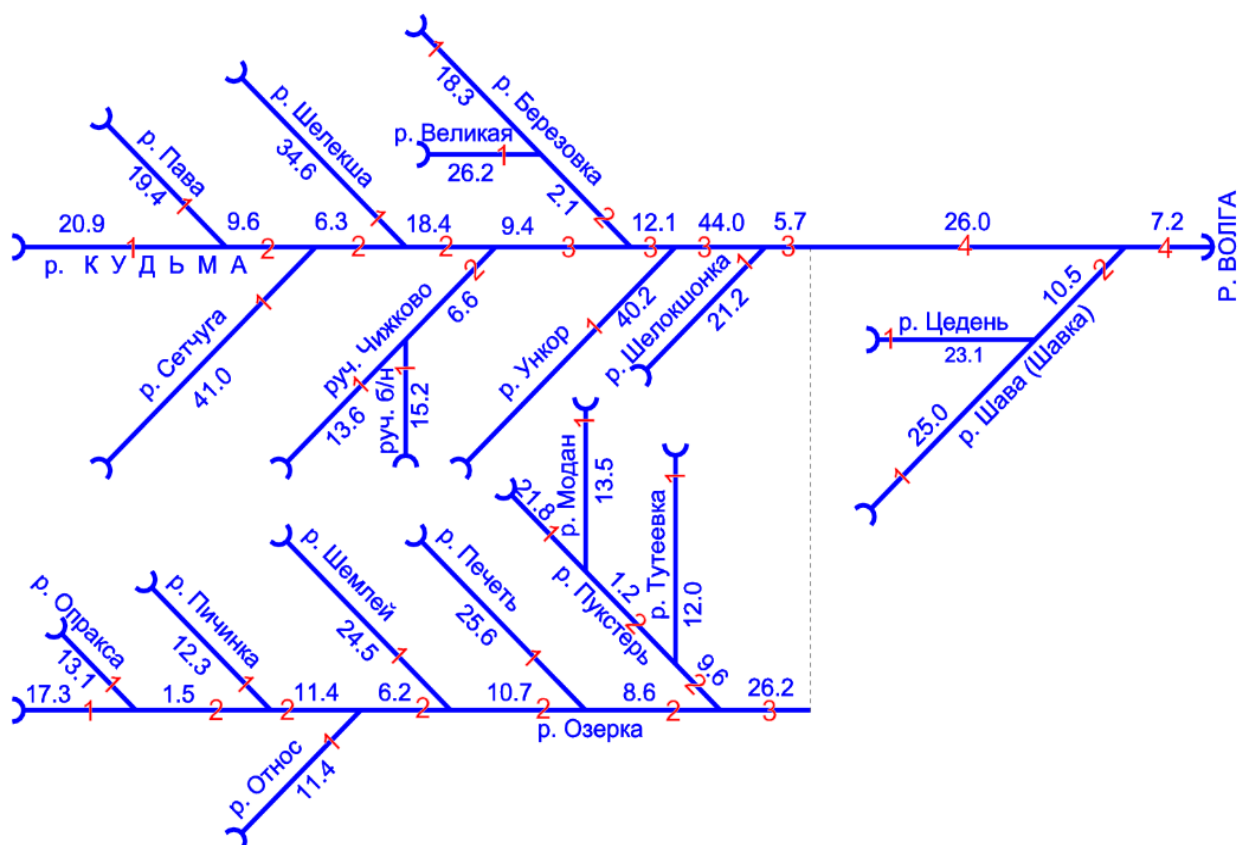


Рисунок 57. Схема гидрографической сети бассейна реки Кудьма с протяжённостью объектов более 10 км

При проведении ряда аналитических запросов в «ГИС Кудьма» было выявлено, что непосредственно с бассейном реки контактирует 39 рек (в том числе основная), 602 ручья, 240 прудов, 774 канала, 19 озёр и 3 водохранилища.

По протяженности объектов: 21 водоток имеет протяжённость более 10 км и 38 водотоков от 5 до 10 км.

Соотношение длин головной реки (159,6, км) и ее притоков (1531,4 км, без учёта каналов) составляет 1:9,6.

Наиболее крупными притоками Кудьмы являются (в скобках указана протяжённость реки, км): р.Озерка (81,9), р.Сетчуга (41,0), р.Ункор (40,2), р.Шавка (Шавка) (35,5), р.Шилекша (34,6) и р.Шелокшонка (21,2).

На рисунке 58 приведён график нарастания площади водосбора р.Кудьма, по основным притокам.

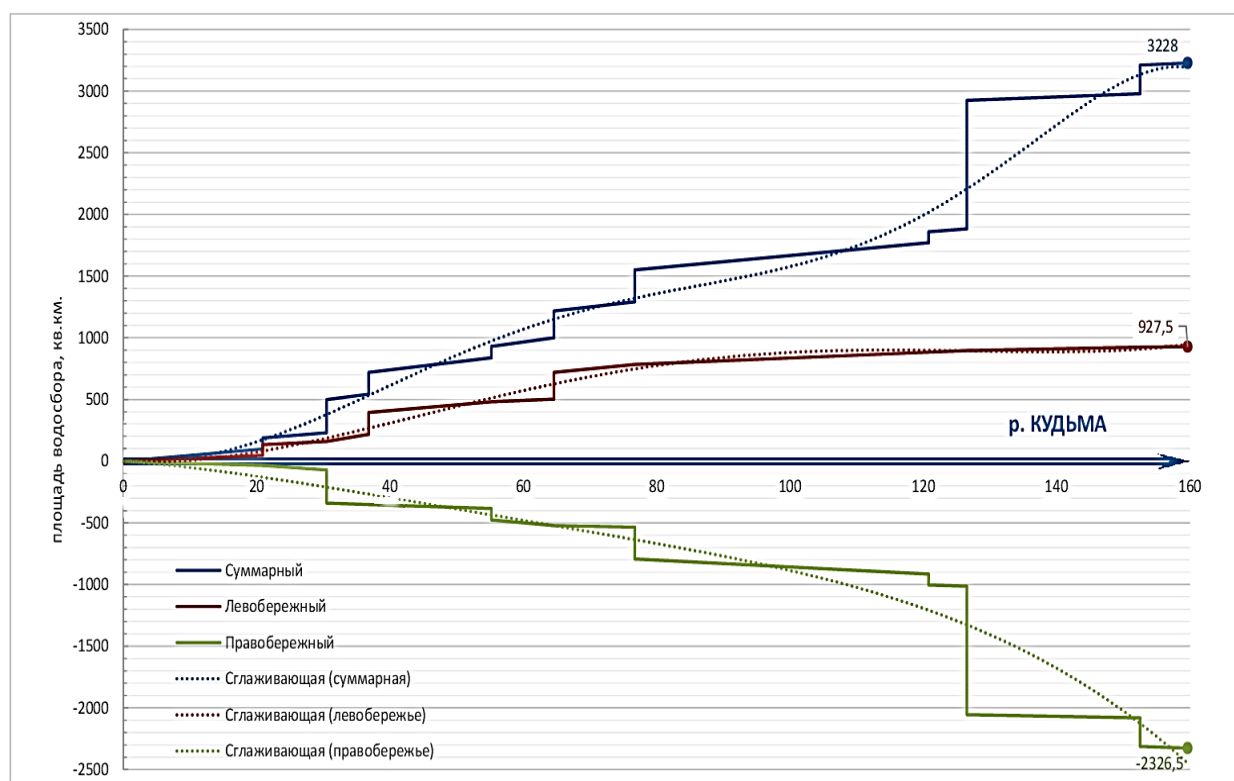


Рисунок 58. График нарастания площади водосбора реки Кудьма (учитывались размеры частных водосборов водных объектов, протяженностью более 10 км)

Полученные, с использованием выровненной цифровой модели рельефа, площади водосборов и протяженности водных объектов позволили уточнить сведения, содержащиеся в государственном водном реестре при выполнении работ по определению границ водоохранных зон и границ прибрежных защитных полос водных объектов на территории Нижегородской области. В отличие от ручного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли и векторизации картографического материала, использование цифровой модели рельефа позволило увеличить скорость получения данных о гидрографических единицах. Применение выровненной ЦМР повысило качество определения длин водных объектов, расположенных в лесной растительности в среднем на 15%. Протяженность водного объекта является главным показателем, в рамках действующего законодательства Российской Федерации, при определении размеров водоохранной зоны реки, а уклоны – прибрежной защитной полосы.

4.3. Экспериментальная разработка - бассейновая ГИС для оценки ущерба от затопления территории

С целью предварительного прогнозирования ущерба в связи с дальнейшим развитием и эксплуатацией Чебоксарской ГЭС, в части строительства низконапорного гидроузла в районе города Нижнего Новгорода и Балахнинского района Нижегородской области, разработана обзорная геоинформационная система – «ГИС-890,50» [39].

В данной бассейновой ГИС используется откорректированная поверхность рельефа по методам, описанным ранее, связи между объектами в ГИС описаны и реализованы согласно требований, предъявляемым к бассейновым системам. Разработанная ГИС позволяет оценить возможный ущерб, наносимый земельным ресурсам при затоплении территорий (рис. 59).

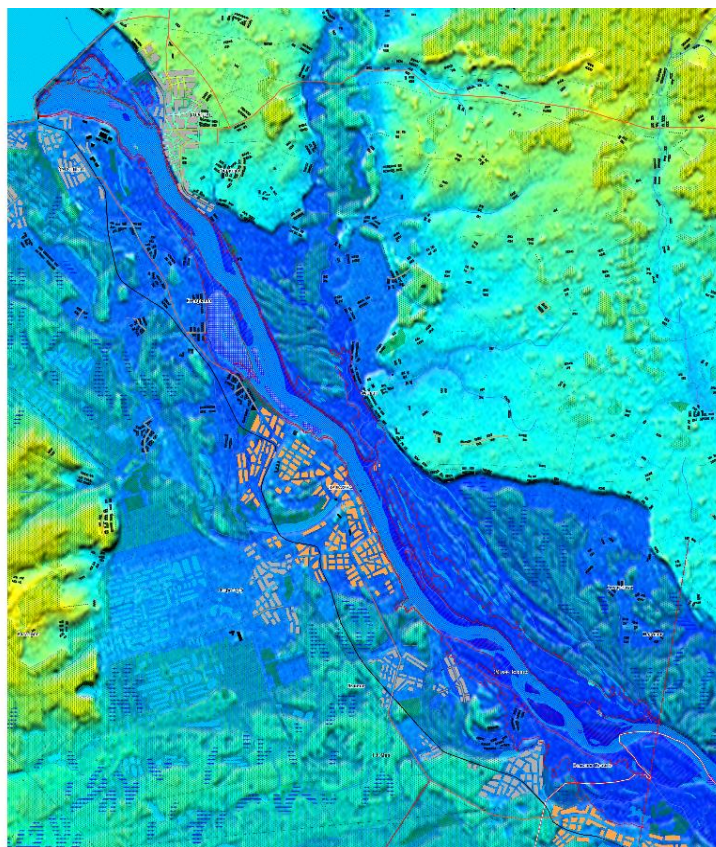


Рисунок 59. Откорректированная поверхность рельефа для ГИС «ГИС-890,50»

Разработанная модель позволяет обеспечить графическую точность масштаба 1 : 100 000, что является достаточным при проведении предварительной оценки ущерба. Для получения более подробной (точной) математической модели рельефа, при оценке наносимого ущерба экосистеме и проведению экономических расчетов, необходимо

использовать проектные материалы обследования территории, прилегаемой к современной акватории водного объекта, в масштабах 1 : 10 000 для земель вне населенных пунктов и 1 : 2 000 для территорий сельских и городских населенных пунктов [27]. Неотъемлемой частью проекта является использование информации об основных земельных угодьях, землепользователей, землевладельцах и материалов государственного кадастра недвижимости. Ниже (рис. 60) приведена сокращенная логическая модель (основные блоки) «ГИС-890,50» (примечание: информационный блок ГКН вводится в ГИС при согласии Федеральной службы государственной регистрации кадастра и картографии).

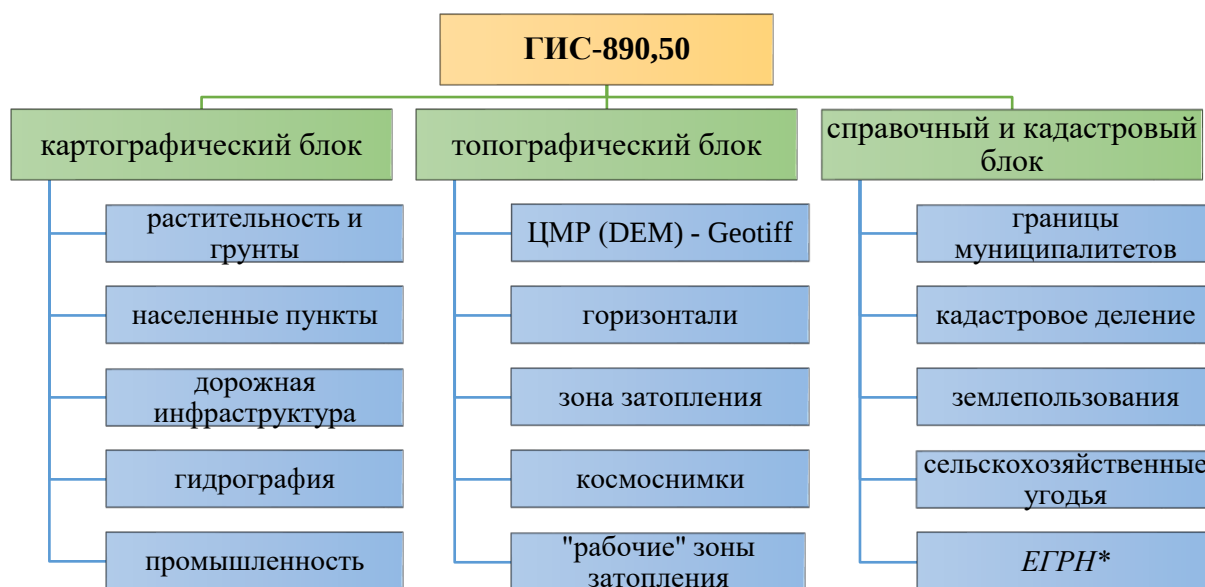


Рисунок 60. Основные блоки «ГИС-890,50» и их содержание

Самыми важными элементами «ГИС-890,50» являются зоны затопления. Зоны строились по данным полученным из части ЦМР в радиусе 5 км от существующей границы акватории с интервалом 0,5 метра (от отметки 60,5 до 70,0 м).

Для каждой из зон затопления были определены площади и ошибки определения площадей с учетом оценки точности, разработанной автором (рис. 61).

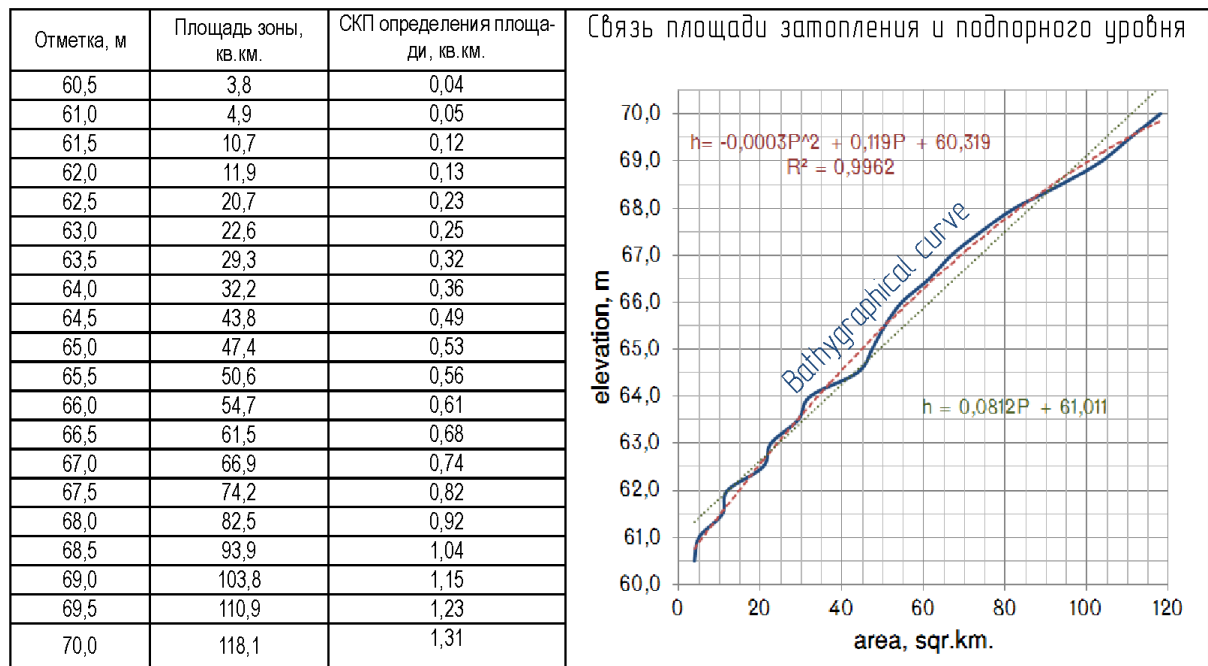


Рисунок 61. Подпор, площадь зоны затопления и их связь

На рисунке 62 приведен фрагмент полученной карты зон затопления. По каждой из зон, путем составления запросов, определялись объекты подверженные затоплению и подтоплению, образованию мелководий и т.д.

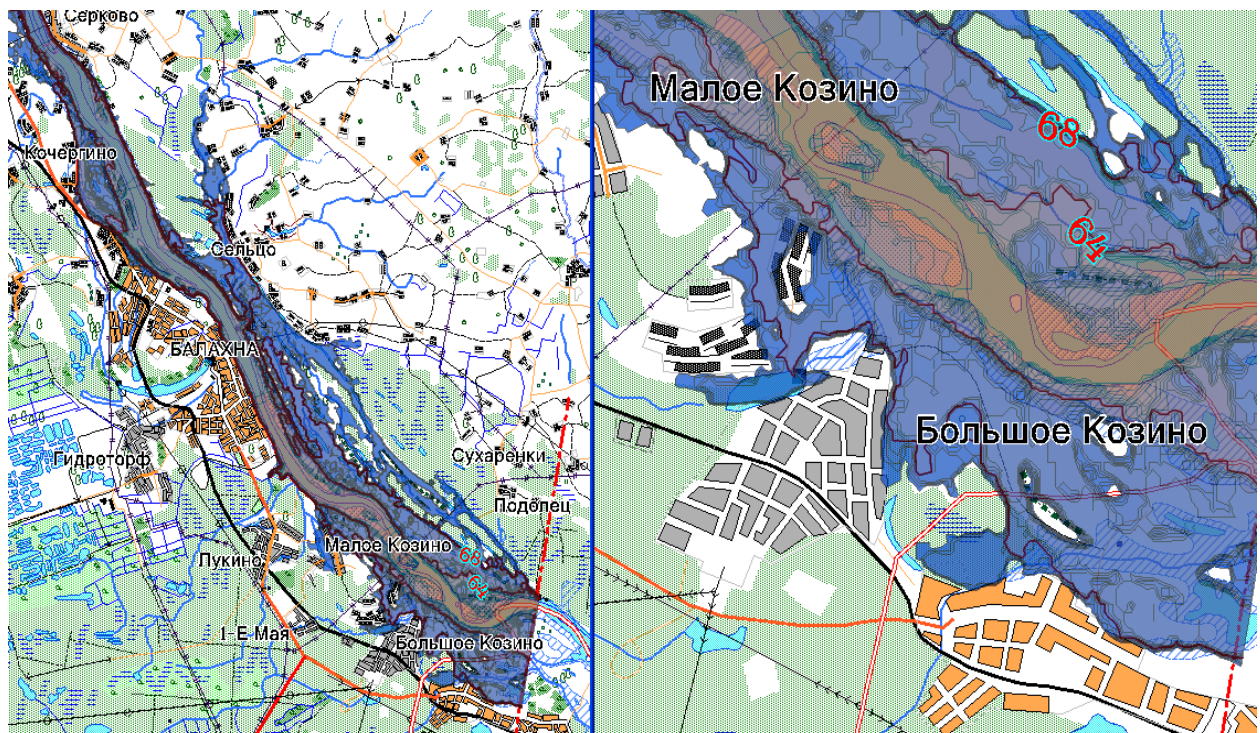


Рисунок 62. Фрагмент карты зон затопления

Сводная таблице 17 по количественным характеристикам зон затопления приведена ниже.

Таблица 17 - Сводная ведомость количественных характеристик зон затопления при строительстве низконапорного гидроузла.

Наименование хозяйств	исходные площади	64.0	66.0	68.0	70.0
Балахнинский район					
Балахнинская птицефабрика, уч.№1	38.5	0.0	0.0	9.9	14.1
Балахнинская птицефабрика, уч.№2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Балахнинская птицефабрика, уч.№3	2.7	0.0	2.5	2.6	2.6
итого, км.кв.	41.7	0.5	3.0	13.1	17.2
Земли сельскохозяйственного назначения, I отделение, ч/уч. №1	61.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Земли сельскохозяйственного назначения, I отделение, ч/уч. №2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3
Земли сельскохозяйственного назначения, I отделение, ч/уч. №3	0.3	0.0	0.3	0.3	0.3
Земли сельскохозяйственного назначения, I отделение, ч/уч. №4	1.3	0.0	0.0	0.6	1.2
Земли сельскохозяйственного назначения, I отделение, ч/уч. №5	0.6	0.0	0.5	0.6	0.6
итого, км.кв.	64.0	0.2	1.1	1.8	2.4
Земли водного фонда	19.2	10.9	11.1	18.9	19.1
итого по балахнинскому району, км.кв.	124.9	11.6	15.2	33.8	38.7
Городецкий район					
ОПХ «Заречное», ч/уч. №1	1.0	0.0	0.0	0.8	1.0
ОПХ «Заречное», ч/уч. №2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7
ОПХ «Заречное», ч/уч. №3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2
ОПХ «Заречное»	67.7	0.0	0.0	0.0	0.0
итого, км.кв.	69.6	0.0	0.0	1.0	1.8
ГЗЗ	0.4	0.0	0.2	0.3	0.4
итого, км.кв.	0.4	0.0	0.2	0.3	0.4
Земли водного фонда	106.9	8.2	17.0	17.5	17.6
итого по Городецкому району, км.кв.	176.9	8.2	17.2	18.9	19.8

Повышение НПУ р.Волга до 66 отметки повлечет за собой: затопление 15 кв. км в Балахнинском районе; затопление 17 кв. км в Городецком районе. Итого в зоне затопления окажутся в основном сельскохозяйственные угодья общей площадью 32 кв. км.

Изменения нормального подпорного уровня до 68 метровой отметки приведет к: затоплению 33,8 кв. км. Балахнинского района; затопление 18,9 кв. км. Городецкого района. Итого, в зоне затопления в основном окажутся сельскохозяйственные угодья в количестве 52,7 кв. км.

При подъеме нормального подпорного уровня до 70 метровой отметки, будет затоплено: по Балахнинскому району 38,7 кв. км; по Городецкому району 19,8 кв. км. Итого, будет затоплено в основном сельскохозяйственных угодий в количестве 58,5 кв. км.

Использование, разработанных автором методов при создании бассейновой ГИС «ГИС-890,50» позволило выявить, что при строительстве низконапорной плотины на 890,5 км судоходного пути на природную среду и хозяйственные территории будет оказано огромное негативное влияние. Это влияние выражается в затоплении территории (38,7 кв. км. Балахнинского района и 19,8 кв. км. Городецкого района), подтопление сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов (Большое и Малое Козино, г. Балахна, п. Сельцо, Сормовский район г. Нижний Новгород), выведение из оборота земель в зоне перестроения берегов (около 17% от общей площади зоны затопления); появление мелководий близ крупных городов (около 25% от общей площади зоны затопления), что приведет к ухудшению санитарной обстановки и в целом – к ухудшению организационно-территориальных условий [39].

4.4. Выводы по главе

На основе проведенного анализа, можно сделать заключение, что ряды гидрографических характеристик водного бассейна можно подразделить на два класса: независимые абсолютные характеристики (средняя высота бассейна, средний угол наклона, среднее значение площади топографической поверхности) и весовые относительные характеристики (вертикальная и горизонтальная расчлененность, извилистость), по принципу использованных объемов данных или её членения на области. Абсолютные характеристики не зависят от масштабного ряда принятого за основу изображения картографического произведения или пространственного разрешения цифровой модели рельефа, в отличие от относительных. Морфометрические характеристики, определяемые по выровненным моделям рельефа и по исходным, имеют различия до 20% от величины получаемого показателя. При этом определенные по выровненным ЦМР относительные характеристики водосбора имеют близкие значения с эталонными. Для проведения автоматизированной обработки цифровой модели рельефа бассейна средней реки с высоким процентом достоверности необходимо проводить анализы на частных водосборах площадью от 0,6 до 0,8% от общей площади территории бассейна.

Создание бассейновых ГИС на базе выровненных ЦМР, например, «ГИС-890,50», позволит не только установить состав, размеры, технические и экономические характеристики отрицательных последствий строительства гидротехнических характеристик, подобной рассмотренной в данной работе, но и разработать с

заинтересованными организациями предложения по предотвращению отрицательных последствий или возмещению убытков последствий и подготовки рекомендаций на разработку соответствующих мероприятий. Отдельной задачей бассейновой ГИС является своевременное реагирование (совместно с местными органами власти) на ситуации, которые могут возникнуть в окружающей природной среде после завершения строительства гидротехнического сооружения, в период его эксплуатации, и разработка мероприятий и рекомендаций по охране окружающей природной среды возникших в новых условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное использование данных дистанционного зондирования различного пространственного разрешения и открытых ГИС-технологий открывают новые возможности для проведения гидрологических исследований.

На основе проведенного исследования и результатов, поставленных экспериментов, можно сделать заключение:

1. На основе анализа открытых данных дистанционного зондирования поверхности Земли систематизированы факторы, влияющие на точность и достоверность цифровых моделей рельефа местности в геоинформационных системах, разработана методика оценки открытых цифровых моделей рельефа с приложением основных принципов теории математической обработки геодезических измерений и теории ошибок измерений. Методика отличается, тем, что позволяет одновременно использовать полученные результаты в восстановлении геометрических параметров поверхности и может быть применен к цифровым моделям рельефа независимо от программного обеспечения, а входящие в обработку данные имеют открытый доступ.

2. Разработан и обоснован метод корректуры и восстановления цифровых моделей рельефа средствами геоинформационных систем. В отличие от существующих методов восстановления поверхностей рельефа, разработанный метод позволяет выполнить работы на неограниченных территориях вне зависимости от плотности растительного покрова и использовать малое количество информации (размерность матрицы для сглаживания от 3×3 до 5×5). Созданные с применением данного метода цифровые модели рельефа имеют высокое подобие действительной форме рельефа и использованы в деятельности Министерства экологии и природных ресурсов Нижегородской области при реализации своих полномочий в части определения зон затопления, подтопления и комплексной оценки территории, что подтверждено актом о практическом применении полученных результатов диссертационного исследования.

3. Разработана процедура для формирования твердых копий стереоизображений-анаглифов ЦМР, обеспечивающих возможность адекватного и достоверного определения высотных параметров элементов изображения для решения аналитических инженерных задач, на базе откорректированных глобальных цифровых моделей рельефа с использованием различных методов формирования (в том числе восстановления)

поверхностей. Процедура построения изображений-анаглифов картографического содержания применена для оптимизации подготовительных работ при производстве аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов, что подтверждено в акте практического применения результатов диссертационного исследования (ООО «Аэрогеодезия»).

4. Вычисленные морфометрические показатели, определяемые по цифровой модели рельефа, точность которой повышена с использованием методов, разработанных автором, соответствует результатам, получаемым по топографическим картам крупного масштаба, натурным обследованиям и существующей изученности. Полученные, с использованием выровненной ЦМР, площади водосборов и протяженности водных объектов позволили уточнить сведения, содержащиеся в государственном водном реестре при выполнении работ по определению границ водоохранных зон и границ прибрежных защитных полос водных объектов на территории Нижегородской области. Применение выровненной ЦМР повысило качество определения длин водных объектов, расположенных в лесной растительности в среднем на 15%. Кроме того, численно подтверждено что для проведения автоматизированной обработки цифровой модели рельефа бассейна средней реки с высоким процентом достоверности необходимо проводить анализы на частных водосборах площадью от 0,6 до 0,8%. Результаты диссертационного исследования имеют непосредственное значение для формирования сведений для государственного водного реестра с применением геоинформационных технологий и комплексных систем и будут использованы в деятельности Верхне-Волжского БВУ при реализации своих полномочий, что подтверждено актом о практическом применении результатов диссертационного исследования.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

BMP – Bit Map Image – универсальный формат растровых графических файлов в виде битового двоичного массива и в зависимости от глубины пиксела может передавать от 2 до 16 000 000 цветов.

DEM – digital elevation model.

Geotiff – Geo Tagged Image File Format – формат растровых графических файлов, представляющий собой расширение формата файла TIFF, дополнительно передаёт информацию о системе координатной привязки, типе проекции и параметров геометрической коррекции.

JPEG – Joint Photographic Expert Group – формат растровых графических файлов, включающий в себя сжатый BMP с возможностью передачи до 16 000 000 цветов, при этом обеспечивает максимальное сжатие файлов, за счёт кодирования с большими потерями из-за применения алгоритма косинусного преобразования и имеет медленную программную распаковку и упаковку.

TIFF – Tagged Image File Format – формат растровых графических файлов, включающий в себя алгоритм сжатия без потери данных, компактен и хорошо оперирует черно-белыми и цветными изображениями, а также изображениями в градациях серого.

ГИС – географические информационные системы.

ЦМР – цифровая модель рельефа.

ЦМВ – DEM – цифровая модель высот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянт, А. М. Геоиконика / А. М. Берлянт; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Акад. естеств. наук Рос. Федерации. - М. : Фирма "Астрей", 1996. - 206, [1] с., [8] л. ил. : ил.; ISBN 5-7594-0025-8.
2. Бобрик, А. А. Геометрическая морфология суши и океана : (Любителям геометрии и географии) / А. А. Бобрик. - Санкт-Петербург : Т-во худож. печати, 1914. - 23 с.
3. Большаков, В. Д. Практикум по теории математической обработки геодезических измерений : учебное пособие для вузов / В. Д. Большаков, Ю. И. Маркузе. - стер. - М : Альянс, 2007. - 352 с.; ISBN 978-5-903034-16-1.
4. Большаков, В. Д. Теория ошибок наблюдений : [Учеб. для геодез. вузов и фак.] / В. Д. Большаков. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Недра, 1983. - 223 с. : граф.
5. Васильков, Ю. В. Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании : Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по экон. специальностям / Ю. В. Васильков, Н. Н. Василькова. - М. : Финансы и статистика, 1999. - 255 с. : ил, табл.; ISBN 5-279-02098-2.
6. Вахтин, Б. М. К вопросу об определении математических характеристик рельефа местности / Б. М. Вахтин // Геодезист. – М, 1930. – б/н. – С.2-3.
7. Волков, Н. М. Принципы и методы картометрии / Н. М. Волков ; Акад. наук СССР. Ин-т географии. - М ; Ленинград : Изд-во и 2-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР, 1950 (М.). - 328 с. : ил., карт.
8. Габитова А.А., Дистанционное зондирование и ГИС в оценке лесозарастания неиспользуемых сельскохозяйственных земель. // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 11. – С. 42-46; Перечень материалов: - URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37926>.
9. Географические информационные системы и дистанционное зондирование GISLAB. Перечень материалов: - URL: <https://gis-lab.info/qa/qgis-landsat-merge.html>.
10. Геоинформатика. Толковый словарь терминов / Под ред. А. М. Берлянта, А. В. Кошкарева. – М. : ГИС-Ассоциация, 1999. – 204 с.
11. Горькавый, И. Н. Разработка и исследование методик обработки и классификации трехмерных данных лазерного сканирования : диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.32 / Горькавый Илья Николаевич; [Место защиты: Моск. гос. ун-т геодезии и картографии]. - Москва, 2011. - 136 с. : ил.

12. ГОСТ Р51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек : введен 2009-09-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. - М. : Стандартинформ, 2009. - III, 15 с.
13. Грицко, Г. Н. Основные принципы создания распределенного территориального кадастра природных ресурсов Кемеровской области на основе технологий ГИС / Г. Н. Грицко, Е. Л. Счастливцев, А. А. Быков // Вычислительные технологии. – 1998. – №3(5) . – С. 28-36.
14. Дворкин Б. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли / Б. А. Дворкин, С. А. Дудкин // Геоматика. – 2013. – №2. – С. 16–39.
15. Дубинин, М. Общее описание ASTER GDEM. GIS-Lab [Электронный ресурс]. - 05 07 2016. – Режим доступа: URL:<http://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html>.
16. Ефремов, Ю. К. Опыт морфологической классификации элементов и простых форм рельефа / Ю. К. Ефремов // Вопросы географии. – М., 1949. - №11. – С. 109-136.
17. Замятин, А. В. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли / А. В. Замятин, Н. Г. Марков. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 176 с. : ил., табл.; ISBN 978-5-9221-0801.
18. Иванников, А. Д., Геоинформатика / А. Д. Иванников, В. П. Кулагин, А. Н. Тихонов, В. Я. Цветков. - М. : МАКС Пресс, 2001. - 349 с. : ил., табл.; ISBN 5-317-00310-5.
19. Информационное обеспечение картографических работ. Полная энциклопедия [Электронный ресурс]: Полная энциклопедия. - 2011-2012. – Режим доступа: URL : www.polnaja-jenciklopedija.ru.
20. Каневский, М. Ф. Элементарное введение в геостатистику / М. Ф. Каневский, В. В. Демьянов, Е. А. Савельева и др. // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов – М.: ВИНТИ. №11, 1999. – 136 с.
21. Капралов, Е. Г. Геоинформатика : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «География», «Экология», «Природопользование», «Геоэкология», «Прикладная информатика (по областям)» : в 2 кн. Кн. 1./ [Е. Г. Капралов и др.] ; под ред. В. С. Тикунова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Академия. - 2010. - 391, [2] с. : ил., табл.; ISBN 978-5-7695-6468-0.
22. Книжников, Ю. Ф. Анаглифическая презентация - новое средство обучения стереоскопическим наблюдениям и измерениям аэрокосмических снимков

/ Ю. Ф. Книжников, Н. Н. Зинчук, Е. Г. Харьковец // Московский государственный университет геодезии и картографии (М.) / Геодезия и аэрофотосъемка. - М. : Известия высших учебных заведений, 2005. - №5. – С. 82-95.

23. Книжников, Ю. Ф. Основы стереоскопического геомоделирования / Ю. Ф. Книжников // Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Геогр. фак. - М. : Научный мир, 2013. - 193 с. : ил., табл.; ISBN 978-5-91522-315-7.

24. Книжников, Ю. Ф. Стереоскопическая модель местности как научное понятие и термин / Ю. Ф. Книжников // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – М. : Московский государственный университет геодезии и картографии (М.), 2010. - №6. – С. 68-79.

25. Компас 3DV15 : [Руководство пользователя]. – Санкт-Петербург : ЗАО АСКОН, 2014. – С. 2488.

26. Коротин А.С. Бассейновая концепция как механизм рационального природопользования / А.С. Коротин, В.В. Пузанова // Культура управления территорией: экономические и социальные аспекты, кадастр и геоинформатика: матер. 4-й региональной науч.-практ. конф. – Н. Новгород, 2016. – С.52-55.

27. Коротин А.С. Бассейновая концепция рационального природопользования, как механизм устойчивого управления развитием территорий/ А. С. Коротин // Культура управления территорией: экономические и социальные аспекты, кадастр и геоинформатика: матер. 2-й науч.-практ. конф. – Н. Новгород, 2014. – С.30-33.

28. Коротин А.С. Построение математической модели для решения задач бассейновой концепции // Культура управления территорией: экономические и социальные аспекты, кадастр и геоинформатика: матер. 5-й региональной науч.-практ. конф. – Н. Новгород, 2016. – С. 52-57.

29. Коротин А.С. Составление карт антропогенной нагрузки с использованием графического метода многомерного анализа/ А.С. Коротин // Культура управления территорией: экономические и социальные аспекты, кадастр и геоинформатика: матер. 4-й региональной науч.-практ. конф. – Н. Новгород, 2016. – С.48-52.

30. Коротин, А.С. Восстановление трёхмерных моделей рельефа местности на основе материалов дистанционного зондирования земли / А.С. Коротин, Е.В. Попов // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 2 (30). – С. 29-34.

31. Коротин, А.С. Геоинформационная система бассейна р. Кудьмы как основа кадастра природных ресурсов территории / А.С. Коротин, Е.К. Никольский // Межвуз. сб. ст. лауреатов конкурсов. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2013. – с. 102 – 104.
32. Коротин, А.С. Исследование современной гидрографической сети в бассейне р. Кудьмы с использованием геоинформационных систем/ А. С. Коротин // Великие реки-2015: тр.17-й междунар. науч.-промыш. форум. – Н.Новгород, 2016. – Т.1. – С. 456-460.
33. Коротин, А.С. Математическое моделирование в комплексном территориальном кадастре природных ресурсов / А.С. Коротин, Д.С. Салдаев // Студенческий научный форум 2016: сб. тр. VIII Междунар. студенческая электронная науч. конф. – 2016. – <http://www.scienceforum.ru/2016/pdf/24031.pdf>.
34. Коротин, А.С. Обработка цифровых моделей рельефа местности с целью повышения достоверности анализа морфометрии водных бассейнов/ А.С. Коротин, Е.В. Попов // Программные системы и вычислительные методы. – 2018. – № 2. – С.67-83. DOI: 10.7256/2454-0714.2018.2.26383. URL: http://e-notabene.ru/ppsvm/article_26383.html
35. Коротин, А.С. Определение оптимальной величины частного элемента площади водосбора при морфометрическом анализе рельефа бассейна водного объекта // Великие реки-2017: тр. 19-й междунар. науч.-промыш. форум. – Н.Новгород, 2017. – Т.1. – С. 390-392.
36. Коротин, А.С. Оценка точности цифровых моделей рельефа, применяемых для территориальных исследований / А.С. Коротин, Е.В. Попов // ГрафиКон'2015 : тр. 25 междунар. конф. по компьютерной графике и зрению. – М.-Протвино, 2015. – С.102-106.
37. Коротин А. С. Передовые технологии геодезических работ на стадии подготовки проекта развития территории заказника «Ичалковский» / Е. К. Никольский, А. В. Чечин, Т. О. Ерискина, А. С. Коротин [и др.] // Культура управления территорией: экономические и социальные аспекты, кадастр и геоинформатика: матер. 9-ой региональной науч.-практ. конф. – Н. Новгород, 2021. – С. 9-16. - ISBN 978-5-528-00451-8.
38. Коротин, А.С. Применение ГИС технологий при планировании использования земельных ресурсов и прогнозирования ущерба от строительства низконапорной плотины/ А. С. Коротин // Великие реки-2014: тр. 16-й междунар. науч.-промыш. форума. – Н.Новгород, 2015. – Т.1. – С. 367-370.

39. Коротин, А.С. Природные ресурсы в геоинформационной системе бассейна реки Кудьмы / А. С. Коротин, Е. К. Никольский // Великие реки-2013: тр.15-й междунар. науч.-промыш. форума. – Н.Новгород, 2013. – Т.3. – С. 430- 433.
40. Коротин, А.С. Прогнозирование воздействия, на земельные ресурсы строительства низконапорной плотины / А. С. Коротин, В. П. Сухомлин // Великие реки-2014: тр. 16-й междунар. науч.-промыш. форума. – Н.Новгород, 2015. – Т.1. – С. 339-341.
41. Коротин, А.С. Проект геоинформационной системы бассейна реки Кудьмы / А. С. Коротин, Е. К. Никольский // Великие реки-2013: тр.15-й междунар. науч.-промыш. форума. – Н.Новгород, 2013. – Т.3. – С. 406-408.
42. Коротин, А.С. Рациональное природопользование в речных бассейнах / А.С. Коротин, В.В. Пузанова // Студенческий научный форум 2016: сб. тр. VIII Междунар. студенческая электронная науч. конф. – 2016.<http://www.scienceforum.ru/2016/1425/19568>.
43. Коротин, А. С. Реконструкция местности на основе откорректированных цифровых моделей рельефа / А. С. Коротин, Е. В. Попов // Проблемы машиноведения : материалы III Междунар. науч.-техн. конф. (23–24 апр. 2019 г., Омск, Россия) : в 2 ч. / Минобрнауки России [и др.] ; [науч. ред. П. Д. Балакин]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. – С. 283-289. - ISBN 978-5-8149-2823-8.
44. Коротин, А.С. Создание цифровой высотной модели с использованием открытых данных дистанционного зондирования Земли / А.С. Коротин, Е.В. Попов // ГрафиКон'2016 : тр. 26 междунар. конф. по компьютерной графике и зрению. – Н. Новгород, 2016. – С.400-403.
45. Коротин, А.С. Составление цифровых моделей рельефа, применяемых в бассейновых ГИС // Великие реки – 2016: тр.18-й международный научно-промышленный форум. – Н.Новгород, 2016. – Т.1. – С.372-373.
46. Коротин, А.С. Формирование и использование изображений-анаглифов трёхмерных моделей местности на основе материалов дистанционного зондирования Земли/ А.С. Коротин, Е.В. Попов // ГрафиКон'2014 : тр. 24 междунар. конф. по компьютерной графике и зрению. – Ростов-на-Дону, 2014. – С.13-16.
47. Коротин, А.С. Формирование изображений-анаглифов по результатам геометрического моделирования цифровых моделей объектов / А.С. Коротин, Е.В. Попов, С.И. Ротков // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 4. – С. 29-34.

48. Коротный, Л. М. Бассейновая концепция в природопользовании / Л.М. Коротный; Отв. ред. В.А. Снытко. - Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2001. - 161, [2] с. : ил., табл.; ISBN 5-94115-018-7.
49. Коротный, Л. М. Административно-территориальное деление России: бассейновый вариант. // География и природные ресурсы. 2006, № 4. с. 29-37.
50. Кочнева, А. А. Обоснование методики оценки качества построения цифровых моделей рельефа по данным воздушного лазерного сканирования при проектировании автодорог : диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.32 / Кочнева Алина Александровна; [Место защиты: С.-Петерб. гос. гор. ун-т]. - Санкт-Петербург, 2016. - 130 с. : ил.
51. Кудрявцева, Т. Л. Проблемы современного землепользования и пути их решений / Т. Л. Кудрявцева, О. А. Назаренко // Использование и охрана земельных ресурсов в системе рационального землепользования. – М. : ФГБОУ ВПО ПГСХА, 2012. – С. 131-138.
52. Кузьменко, Я. В., Применение бассейновой концепции природопользования для почвоводоохранного обустройства агроландшафтов / Я. В. Кузьменко, Ф. Н. Лисецкий, А. Г. Нарожная // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. №14(1-9). С. 2432-2435.
53. Курс высшей математики : [Для вузов] / А. В. Игнатьева, Т. И. Краснощекова, В. Ф. Смирнов ; Под ред. проф. П. И. Романовского. - М. : Высш. школа, 1964. - 683 с.
54. Мозжерин, В. И. Река Казанка и ее бассейн / В. И. Мозжерин, О. П. Ермолаев, В. В. Мозжерин. - Казань : Изд. дом «Меддок», 2012. - 279 с. : ил., карт., табл., цв. ил., карт.; ISBN 978-5-905775-28-4.
55. Мусин О. Р. Цифровые модели для ГИС // Информ. бюл. ГИС – Ассоциации. – 1998. – № 4 (16). – С. 30–32; № 5 (17). – С. 28–29.
56. Набиев, А. А. Методы моделирования компьютерной географии / А. А. Набиев //Актуальные вопросы современной информатики / материалы международной научно-практической конференции. – Коломна, 2000. – №2. – С.160-163.
57. Назаров, А. С. Фотограмметрия : Учеб. пособие для студентов ВУЗов / А. С. Назаров. - Мн. : ТетраСистем, 2006 – 368 с: ил.
58. Найдено, В. В. Аэрокосмический мониторинг: разработка средств и методов аэрокосмического и наземного мониторинга в геоинформационной системе волжского

бассейна (заключительный) : [отчет о НИР] / В. В. Найденко и др. – Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, 1997. – 600 с.

59. Найденко, В. В. Великая Волга на рубеже тысячелетий: От экологического кризиса к устойчивому развитию : [монография]. В 2 т. Т. 1 / В. В. Найденко. – Н. Новгород : Промграфика, 2003. – 428 с.

60. Найденко, В. В. Разработка средств и методов аэрокосмического мониторинга и геоинформационной системы состояния окружающей среды Волжского бассейна : [отчет о НИР] / В. В. Найденко и др. – Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, 2000.

61. Орлова, Е. В. Определение географических и гидрологических характеристик бассейна Печоры с использованием ГИС-технологий / Е. В. Орлова // Метеорология и гидрологи. – 2008. - №4. – С. 81-88.

62. Орлова, Е. В. Применение ГИС для оценки водных ресурсов Республики Коми / Е. В. Орлова // Геоинформатика. – М. : ФГУП Государственный научный центр РФ Всероссийский НИИ геологических, геофизических и геохимических систем. – 2007. - №4. – С. 21-25.

63. Павлова, А. И. Анализ методов интерполирования высот точек для создания цифровых моделей рельефа / А.И. Павлова // Автометрия. – 2017. - № 2. – С. 86-94.

64. Павлова, А. Н. Геоинформационное моделирование речного бассейна по данным спутниково съемки SRTM (на примере бассейна р. Терешки) / А. Н. Павлова // Известия Саратовского университета. Наука о Земле. – 2009. – №1(9) . – С. 39-44.

65. Подольская Е. С. Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса для распознавания изображения дорог в лесном хозяйстве // Вопросы лесной науки, 2022, Т.5 № 4. С. 3 –21. – URL: <https://jfsi.ru/5-4-2022-podolskaia/>

66. Протодяконов, М. М. Числовые характеристики топографических условий местности, исчисление эксплуатационных расходов и приложение их к экономике железных дорог / Проф. М. М. Протодяконов. - М. : [б. и.], [1925]. - 86 с., 10 л. диагр., граф.;

67. Рис, У. Г. Основы дистанционного зондирования / У. Г. Рис ; пер. с англ. М. Б. Кауфман и А. А. Кузьмичева. - М. : Техносфера, 2006. – 336, [12] с., цв. вклейки. ISBN: 5-94836-094-6.

68. Сборник задач и упражнений по геоинформатике : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по экологическим специальностям /

[Е. Г. Капралов] ; под ред. В. С. Тикунова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Академия, 2009. - 512 с. : ил., табл.; + CD-ROM.; ISBN 978-5-7695-4247-3

69. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2015660773. Рос. Федерация. «Volume Graphics Analyzer» (VolGA) / А. С. Коротин, Е. В. Попов ; правообладатель Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. — № 2015616338 ; заявл. 07.07.2015 ; зарегистр. 08.10.2015 — 1 с.

70. Серапинас, Б. Б. Математическая картография : учеб. по специальностям «Картография» и «География» / Б. Б. Серапинас. - М. : Academia, 2005. - 335, [1] с. : ил.; ISBN 5-7695-2131-7.

71. Симонов, Ю. Г. Морфометрический анализ рельефа: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению и спец. «География» / Ю. Г. Симонов; МГУ им. М. В. Ломоносова. - М. ; Смоленск : Изд-во Смоленск. гуманит. ун-та, 1998. - 270 с. : ил., портр.; ISBN 5-88984-043-6.

72. Сироткин, М. П. Математическая характеристика сложности рельефа земной поверхности / М. П. Сироткин // Геодезист. – М., 1937. – №6. – С.115-118.

73. Скворцов, А. В. Триангуляция Делоне и её применение / А. В. Скворцов ; Том. гос. ун-т. Фак. информатики (ФИНФ). - Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002. - 127 с. : ил. ; ISBN 5-7511-1501-5

74. Сонюшкин, А.В. Совершенствование технологий создания ортофотопланов по космическим изображениям высокого разрешения: специальность 25.00.34 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сонюшкин Антон Владимирович; научный руководитель А.Г. Чибуничев ; Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК). – Москва, 2015. – 117 с. : ил. – Текст : непосредственный.

75. Сосновский, А. В. О точности цифровых моделей рельефа, полученных методом космической радиолокационной интерферометрии / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. - № 2. – С. 122-129.

76. Хромых, В. В. Цифровые модели рельефа : учебное пособие / В. В. Хромых, О. В. Хромых ; Федеральное агентство по образованию, Томский гос. ун-т. - Томск : ТМЛ-Пресс, 2007. - 174, [1] с. : ил., табл., цв. ил.; ISBN 5-91302-033-2.

77. Чандра, А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош ; пер. с англ. А. В. Кирюшина. - М. : Техносфера, 2008. - 307, [1] с., [8] л. ил., цв. ил., к. : ил., табл., факс., цв. ил., к.; ISBN 978-5-94836-178-9 (В пер.).
78. Ченцов, В. Н. Морфометрические показатели рельефа применительно к геоморфологическим картам. Труды Ин-та географии АН СССР. 1940 г., Вып. 36. С. 69-71
79. Черниковский, Д. М. Оценка связей морфометрических характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов на основе цифровых моделей рельефа ASTER и SRTM / Д. М. Черниковский, В. Н. Сукачева // Сибирский лесной журнал. 2017. – № 3. – С. 28-39.
80. Чечин, А. В. Геометрическое моделирование и отображение объектов бассейновой геоинформационной системы экологической направленности : диссертация ... кандидата технических наук : 05.01.01. - Нижний Новгород, 2004. - 212 с. : ил.
81. Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгердт ; пер. с англ. А. В. Кирюшина, А. И. Демьяникова. - М. : Техносфера, 2010. - 556 с., [16] л. цв. ил. : ил., цв. ил., карты, табл.; ISBN 978-5-94836-244-1.
82. ЩигOLEв, Б. М. Математическая обработка наблюдений : Учебник для ун-тов по специальности «Астрономия». - 3-е изд. - М. : Наука, 1969. - 344 с. : граф.
83. Яковченко, С. Г. Создание геоинформационных систем в инженерной гидрологии : дис. ... док. техн. наук : 25.00.35 / Яковченко Спартак Геннадьевич. – Барнаул, 2007. - 406 с. : ил.
84. Abdul-Rahman, A. Innovation in 3D Geo Information Systems / A. Abdul-Rahman, M. Pilouk., S. Zlatanova, V. Coors – Berlin Heidelberg : Berlin : Springer-Verlag., 2006. – P.760.
85. Abdul-Rahman, A. Spatial Data Modelling for 3D GIS / A. Abdul-Rahman, M. Pilouk. – Berlin Heidelberg : Berlin : Springer-Verlag., 2008. – P.289.
86. Adejuwon, J. O. Hydrological Response Patterns of some Third Order Streams on the Basement Comple of Southwestern Nigeria / J. O. Adejuwon, L. K. Jeje, O. O. Ogunkoya // Hydrological Science Journal. – 1984. - №3(28) – P. 377-391.
87. Aguilar F.J., F. Aguera, M.A. Aguilar, F. Carvajal, Effect of terrain morphology, sampling density and interpolation methods on grid DEM accuracy, Photogramm. Eng. Remote Sens., 71 (2005), pp. 805-816

88. Arefi H., P. Reinartz, Accuracy enhancement of ASTER global digital elevation models using ICESat data, *Remote Sens.*, 3 (7) (2011), pp. 1323-1343
89. Arun P.V., A comparative analysis of different DEM interpolation methods, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, Volume 16, Issue 2, December 2013, Pages 133-139
90. Arun Patel, S.K. Katiyar, Vishnu Prasad, Performances evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS), *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, Volume 19, Issue 1, June 2016, Pages 7-16
91. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement. [Online]: Jet Propulsion Laboratory NASA, California Institute of Technology 2012. – Режим доступа: URL. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.
92. Athmania and Achour, 2014, D. Athmania, H. Achour, External validation of the ASTERGDEM GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI-SRTM v4. 1 free access digital elevation models (DEMs) in Tunisia and Algeria, *Rem. Sens.*, 6 (5) (2014), pp. 4600-4620
93. Ayeni, B. An evaluation of digital elevation modeling in GIS and cartography / B. Ayeni, K. J. Samuel // *Geo-spatial Inform. Sci.*, 2014 – №17, Is. 2. – P. 139-144.
94. Baker, W. L. A review of models of landscape change / W. L. Baker // *Landscape Ecology*. - The Hague: SPB Academic Publishing, 1989 - №2. – P. 111-133.
95. Bates et al., 1998, P.D. Bates, M. Horritt, J.M. Hervouet, Investigating two-dimensional, finite element predictions of floodplain inundation using fractal generated topography, *Hydrol. process.*, 12 (8) (1998), pp. 1257-1277
96. Baugh et al., 2013, C.A. Baugh, P.D. Bates, G. Schumann, M.A. Trigg, SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy, *Water Resour. Res.*, 49 (9) (2013), pp. 5276-5289
97. Berry P.A.M., R.G. Smith, J. Benveniste, ACE2: the new global digital elevation model, *Gravity, Geoid and Earth Observation*, Springer, Berlin (2010), pp. 231-237, 10.1007/978-3-642-10634-7_30
98. Beven, K. J. Terrain analysis and distributed modelling in hydrology / K. J. Beven, I. D. Moor // Wiley & Sons, 1993. – 246 p.
99. Biswajit, M. Analysis of Hydrological Inferences through Morphometric Analysis: A Remote Sensing-GIS Based Study of Gandheswari River Basin in Bankura District, West Bengal

/ M. Biswajit, M. Biswaranjan // International Journal of Humanities & Social Science Studies (IJHSSS) A Peer-Reviewed Bi-monthly Bi-lingual Research Journal, IV, 201. - №II. – P. 68-80.

100. Bola, A. An evaluation of digital elevation modeling in GIS and Cartography / A. Bola, S. Kayode // Geo-spatial Information Science. – 2014. - Vol.17. – P. 139-144.

101. Bolkas D., G. Fotopoulos, A. Braun, I. Tziavos, Assessing digital elevation model uncertainty using GPS survey data, J Surveying Eng, 142 (3) (2016)

102. Bonin O., F. Rousseaux, Digital terrain model computation from contour lines: how to derive quality information from artifact analysis, Geoinformatica, 9 (3) (2005), pp. 253-268

103. Bruzzone, L.; Fernández-Prieto, D. Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2000, 38, 1171–1182.

104. Burrough P.A., R.A. McDonnell, Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, New York (1998), pp. 333–335

105. Calculates hydrological parameters and RUSLE factors. GRASS Development Team, GRASS GIS 7.3.svn - r.watershed. Reference Manual. [Online] 2003-2017. – Режим доступа: URL. <https://grass.osgeo.org/grass73/manuals/r.watershed.html>.

106. Chang, K T. Introduction to Geographical Information Systems / K T. Chang. - New York : McGraw Hill, 2008. – 184 p. ISBN 978-0-07-780540-1.

107. Chaplot V., F. Darboux, H. Bourennane, S. Leguédais, N. Silvera, K. Phachomphon, Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density, Geomorphology, 77 (2006), pp. 126-141

108. Chen C.F., X. Wang, C.Q. Yan, B. Guo, G.L. Liu, A total error-based multiquadric method for surface modeling of digital elevation models, GIScience Remote Sens, 53 (5) (2016), pp. 578-595

109. Chen Chuanfa, Tianxiang Yue, A method of DEM construction and related error analysis, Computers & Geosciences, Volume 36, Issue 6, June 2010, Pages 717-725

110. Chen, C. A robust interpolation method for constructing digital elevation models from remote sensing data / C. Chen, F. Liu , Y. Li, C. Yan, G. Liu // Geomorphology. – 2016. - Vol.268. – P. 275-287.

111. Chen, H. Hydraulic correction method (HCM) to enhance efficiency of SRTM DEM in flood modeling / H. Chen, Q. Liang , Y. Liu, S. Xie // Journal of Hydrology. – 2018. - Vol.559. – P. 56-70.

112. Conrad, O. Module Hypsometry. [Online]: SAGA-GIS Module Library Documentation (v2.2.0). - 2001. - Режим доступа: URL. http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.2.0/ta_morphometry_5.html.
113. Davis C.H., H. Jiang, X.Y. Wang, Modeling and estimation of the spatial variation of elevation error in high-resolution DEMs from stereo-image processing, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (11) (2001), pp. 2483-2489
114. Dean Al. STL – формат быстрого прототипирования. Ч. I. Вывод в формате STL / AlDean, (editor of «Prototype» magazine) // CAD/CAM/CAE Observer – Рига. 2005. - №5(23). P. 64-69.
115. Desmet P.J.J., Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs, Earth Surface Processes and Landforms, 22 (6) (1997), pp. 563-580
116. Earth Explorer. United States Geological Survey, science of a changing world. [Online] U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey. - 2016. - Режим доступа: URL. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
117. Easternbrook, D. J. Surface Processes and Landforms / D. J. Easternbrook; New York : Macmillian Publishing Co., 1993. – 325 p. ISBN 978-0-13-860958-0.
118. Easy Trace Professional: Manual - Easy Trace group, 2010. – 567 p.
119. Ebisemiju, F. S. A Reduced Rank Model of Drainage Basin Morphology / F. S. Ebisemiju // Geografiska Annaler, 1979. - №16A(1-2). – P. 103-112.
120. Elkhachy, I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia / I. Elkhachy // Ain Shams Engineering Journal. – 2018. – Vol.9. Iss.4 – P. 1807-1817.
121. Ettritch, G. Enhancing digital elevation models for hydraulic modeling using flood frequency detection / G. Ettritch, A. Hardy, L. Bojang, D. Cross, P. Bunting, P. Brewer// Remote Sensing of Environment. – 2018. - Vol.217. – P. 506-522.
122. Fan L., J. Smethurst, P. Atkinson, W. Powrie, Propagation of vertical and horizontal source data errors into a TIN with linear interpolation, Int J Geographical Inf Sci, 28 (7) (2014), pp. 1378-1400
123. Fayad, I. Coupling potential of ICESat/GLAS and SRTM for the discrimination offorest landscape types in French Guiana / I. Fayad, N. Baghdadi, V. Gond, J. S. Bailly, N. Barbier, M. El Hajj, F. Fabre // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2014. - Vol.33. – P. 21-31.

124. Fisher P.F., 1st experiments in Viewshed uncertainty—simulating fuzzy Viewsheds, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58 (3) (1992), pp. 345-352
125. Fisher P.F., 1st experiments in Viewshed uncertainty—the accuracy of the Viewshed area, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57 (10) (1991), pp. 1321-1327
126. Fisher P.F., Improved modeling of elevation error with geostatistics, *Geoinformatica*, 2 (3) (1998), pp. 215-233
127. Florinsky I.V., Errors of signal processing in digital terrain modelling, *International Journal of Geographical Information Science*, 16 (5) (2002), pp. 475-501
128. Florinsky, I. V. Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM : A case study on Zaoksky testing ground, Central European Russia / I. V. Florinsky, T. N. Skrypitsyna, O. S. Luschikova // *Remote Sensing Letters*. – 2018. - №7. – P. 706-714.
129. Florinsky, I. V. Influence of topography on some vegetation cover properties / I. V. Florinsky, G. A. Kuryakova // *Catena*. – 1996. - Vol.27. – P. 123-141.
130. Frey H., F. Paul, On the suitability of the SRTM DEM and ASTERGDEM GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories, *Int J Appl Earth Obs Geoinf* (2011)
131. Gallant and Read, 2009, J.C. Gallant, A. Read, Enhancing the SRTM data for Australia, *Proc. Geomorphometry*, 31 (2009), pp. 149-154
132. Gao J., Impact of sampling intervals on the reliability of topographic variables mapped from grid DEMs at a micro-scale, *International Journal of Geographical Information Science*, 12 (1998), pp. 875-890
133. Gardiner, V. Drainage Basin Morphometry / V. Gardiner // *Technical Bulletin*; s.l. – British Geomorphological Resource Group, 1975. – 14 p.
134. Gesch D., M. Oimoen, J. Danielson, D. Meyer, Validation of the ASTER global digital elevation model version 3 over the conterminous United States, *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci* (2016), 10.5194/isprs-archives-XLI-B4-143-2016XLI-B4
135. GIS, Working Group 3.1 –, [comp.]. Guidance Document No 9 / Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC); Implementing the Geographical Information System Elements (GIS) of the Water Framework Directive. - Luxembourg : European Communities, 2003. – 166 P.

136. Gorokhovich, Y. Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristic / Y. Gorokhovich, A. Voustianiouk // *Remote Sensing of Environment*, 2006. - №110. – P.409-415.
137. Gregory, K. J. *Drainage Basin Form and Process: A Geomorphological Approach* / K. J. Gregory, Walling, D. E. – London : Edward Arnold, 1973. – 456 p.
138. Grohmann, C. H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30 / C. H. Grohmann // *Remote Sensing of Environment*. – 2018. - Vol.212. – P. 121-133.
139. Heritage George L., David J. Milan, Andrew R.G. Large, Ian C.Fullerd, Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality, *Geomorphology*, Volume 112, Issues 3–4, 15 November 2009, Pages 334-344
140. Hewlett, J. D. Factor Affecting the Response of Small Watersheds to Precipitation in Humid Areas / J. D. Hewlett, A. R. Hibbert // *Forest Hydrology*, 1967. – P. 275-290.
141. Hirano A., R. Welch, H. Lang, Mapping from ASTER GDEM stereo image data: DEM validation and accuracy assessment, *ISPRS J Photogramm Rem Sens*, 57 (2003), pp. 356-370
142. Hirt, 2018, Christian Hirt , Artefact detection in global digital elevation models (DEMs): The Maximum Slope Approach and its application for complete screening of the SRTM v4.1 and MERIT DEMs, *Remote Sensing of Environment*, Volume 207, 15 March 2018, Pages 27-41
143. Höhle and Höhle, 2009, J. Höhle, M. Höhle, Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 64 (2009), pp. 398-406
144. Holmes K.W., O.A. Chadwick, P.C. Kyriakidis, Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling, *Journal of Hydrology*, 233 (1–4) (2000), pp. 154-173
145. Horton, R. E. *Drainage Basins Characteristics* / R. E. Horton // *Trans. America Geophys. Union*. 1932, - №13 - P. 350-361.
146. Huang, H. Integration of multi-resource remotely sensed data and allometric models for forest aboveground biomass estimation in China / H. Huang, G. Liu, X. Wang, X. Zhou, P. Gong // *Remote Sensing of Environment*. – 2019. - Vol.221. – P. 225-234.

147. Huili et al., 2018, Hydraulic correction method (HCM) to enhance the efficiency of SRTM DEM in flood modeling, *Journal of Hydrology*, Volume 559, April 2018, Pages 56-70 (Huili Chen, Qiuhua Liang, Yong Liu, Shuguang Xie)
148. Hunter G.J., M.F. Goodchild, Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases, *Geographical Analysis*, 29 (1) (1997), pp. 35-49
149. Huss R.E., M.A. Pumar, Effect of database errors on intervisibility estimation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63 (4) (1997), pp. 415-424
150. Ifabiyi, I. P. A Reduced Rank Model of Drainage Basin Response to Runoff in Upper Kaduna Catchment of Northern Nigeria / I. P. Ifabiyi // *Geostudies Forum*, 2004. – P. 109-117.
151. Jacobsen, 2010, Jacobsen, K., 2010. Comparison of ASTER GDEMs with SRTM height models. *EARSeL Symposium, Dubrovnik. Remote Sensing for Science, Education and Natural and Cultural Heritage*, pp. 521-526.
152. Jain, V. and Sinha, R. Evaluation of Geomorphic Control on Flood Hazard Through Geomorphic Instantaneous Unit Hydrograph. *Research Communications / V. Jain // Current Science*. Dec. 10, 2003. №85(11) – P. 1596-1600.
153. Jarihani et al., 2015, A.A. Jarihani, J.N. Callow, T.R. McVicar, T.G. Van Niel, J.R. Larsen Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic Modeling in large, low-gradient and data-sparse catchments, *J. Hydrol.*, 524 (2015), pp. 489-506
154. Jarvis, A. Practical use of SRTM data in the tropics – Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data / A. Jarvis, J. Rubiano, A. Nelson,; A. Farrow, M. Mulligan. – *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)*, 2004. - №198. – P. 32.
155. Jenson J.R., *Remote sensing of the environment – an earth resource perspective*, Pearson Education (2000), pp. 137-180, p. 285–332
156. Jing et al., 2014, C. Jing, A. Shortridge, S. Lin, J. Wu, Comparison and validation of SRTM and ASTER GDEM for a subtropical landscape in Southeastern China, *Int. J. Digital Earth*, 7 (12) (2014), pp. 969-992
157. Johnston K., J.M. Ver-Hoef, K. Krivoruchko, N. Lucas, *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*, ESRI, Redlands (2001), p. 300
158. Jones J., A. A. *Global Hydrology: Processes, Resources and Environmental Management / J., A. A. Jones. – Harlow : Longman*, 1997. – 399 p. ISBN 978-0-582-09861-9.

159. Jones K.H., A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM, *Computers & Geosciences*, 24 (4) (1998), pp. 315-323
160. Kaab A., Combination of SRTM3 and repeat ASTERGDEM data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya, *Rem Sens Environ*, 94 (2005), pp. 463-474
161. Kamp U., T. Bolch, J. Olsenholler, Geomorphometry of Cerro Sillajhuay (Andes, Chile/Bolivia): comparison of digital elevation models (DEMs) from ASTERGDEM remote sensing data and contour maps, *Geocarto Int*, 20 (1) (2005), pp. 23-33
162. Karuppannan, S. Morphometric Analysis using GIS in Pambar Sub Basin, Krishnagiri and Vellore District, Tamilnadu, India / S. Karuppannan, S. Venkateswaran, P. M. Vijaya // *International Journal of Advanced Earth Science and Engineering*, 2015. - №4. – P. 293-307.
163. Khan, S.H.; He, X.; Porikli, F.; Bennamoun, M. Forest Change Detection in Incomplete Satellite Images with Deep Neural Networks. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2017, 55, 5407–5423.
164. Kocak G., G. Buyuksalih, M. Oruc, Accuracy assessment of interferometric digital elevation models derived from the shuttle radar topography mission x- and c-band data in a test area with rolling topography and moderate forest cover, *Opt Eng*, 44 (3) (2005)
165. Lefsky, 2010, M.A. Lefsky, A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System, *Geophys. Res. Lett.*, 37 (15) (2010)
166. Li et al., 2013, P. Li, C. Shi, Z. Li, J.-P. Muller, J. Drummond, X. Li, T. Li, Y. Li, J. Liu, Evaluation of ASTER GDEM using GPS benchmarks and SRTM in China, *Int. J. Remote Sens.*, 34 (5) (2013), pp. 1744-1771
167. Li, Z. Digital terrain modelling: principles and methodology / Z. Li, Q. Zhy, C. Gold. – CRC Press, 2005. – 318 p.
168. Liu, M.; Chai, Z.; Deng, H.; Liu, R. A CNN-Transformer Network With Multiscale Context Aggregation for Fine-Grained Cropland Change Detection. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2022, 15, 4297–4306.
169. Longley, P. A. Geographic Information Systems and Science / P. A. Longley, M. Goodchild, D. J. Maguire, D. W. Rhind – John Wiley & Sons, Hoboken, NJ : Wiley, 2015 - , (4rd Edition), xvi, 477 p. : il. color, maps ; 28 cm.

170. Magesh, N. S. A GIS based Automated Extraction Tool for the Analysis of Basin Morphometry / N. S. Magesh, , Chandrasekar, N. and Kaliraj // Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, July 2012. - №2. – P. 32-35.
171. Mahalingam, B. R. Morphometric Analysis of Tungabhadra Drainage Basin in Karnataka using Geographical Information System / R. B. Mahalingam, P. Jayashree // Journal of Engineering, Computers & Applied Sciences (JEC&AS), 7, July 2013. - №2 – P. 293-307.
172. MapInfo Professional – [Manual]. – NY : MapInfo Corporation, 2008. – 662 p.
173. Marchesini, I. Morphometric signatures of landslides / I. Marchesini // Third Open Source Geospatial Research & Education Symposium (OGRS). 10-13 June 2014. - Espoo, Finland : s.n.. – P. 99-105.
174. McAllister, D. F. Methods for computing color anaglyphs / D. F. McAllister, Y. Zhou, S. Sullivan // SPIE-The International Society for Optical Engineering, february 24, 2010. - Stereoscopic Displays and Applications; №XXI. – P. 113-126.
175. Metz, M. Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search / M. Metz, H. Mitasova, R. S. Harmo // Hydrol. Earth Syst. Sci., 2011. - №15. – P. 667–678.
176. Milan D.J., Terrestrial laser-scan derived topographic and roughness data for hydraulic modelling of gravel-bed rivers, G.L. Heritage, A.R.G. Large (Eds.), Laser Scanning for the Environmental Sciences, Wiley-Blackwell, Chichester, UK (2009), pp. 133-146
177. Mitchell, A. EOSDIS, NASA's Earth Observing System Data and Information System. National Aeronautics and Space Administration. [Online] NASA Official: Mitchell A. – Режим доступа: URL : <https://reverb.echo.nasa.gov/>.
178. Monckton C.G., An investigation into the spatial structure of error in digital elevation data, M.F. Worboys (Ed.), Innovations in GIS 1, Taylor & Francis, London (1994), pp. 201-211
179. Morisawa, M. E. Relation of Morphometric Properties to Runoff in the Little Mill Creek, Ohio Drainage Basin / M. E. Morisawa. - Technical Report, 1959. – 17 p.
180. Mukherjee et al., 2013, тS. Mukherjee, P. Joshi, S. Mukherjee, A. Ghosh, R. Garg, A. Mukhopadhyay, Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM), Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 21 (2013), pp. 205-217
181. Neteler, M. Open source GIS a GRASS GIS approach. 3 Verlag / M. Neteler, H. Mitasova. – Berlin, Heilderberg : Springer, 2008 – 406 p.

182. Nwa, E. U. Hydrologic and Physiographic Characteristics of Small, Forested Humid Tropical Watersheds / E. U. Nwa // Nigerian Geographical Journal, 1979. - №1(22) – P. 45-51.
183. O'Loughlin et al., 2016, F.E. O'Loughlin, R.C.D. Paiva, M. Durand, D.E. Alsdorf, P.D. Bates, A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product, Remote Sens. Environ., 182 (2016), pp. 49-59
184. O'Sullivan, D. 2003 Geographic Information Analysis / D. O'Sullivan, D.J. Unwin // Hoboken, John Wiley & Sons, Ltd., 2010. — 405 p.
185. Okabe, A. Generalized network Voronoi diagrams: concepts, computational methods, and applications / A. Okabe, T. Satoh, T. Furuta, A. Suzuki, K. Okano // International Journal of Geo- graphical Information Systems, 2008. - №2 - P. 43-71.
186. Okoko, E. E. The Role of Geomorphic Features in Urban Flooding: The case of Ala River in Akure, Nigeria / E. E. Okoko, J., A. B. Olujinmi // Int. Journal of Environmental Issues, 2003. - №1(1). – P. 192-201.
187. Oksanen J., T. Sarjakoski, Error propagation analysis of DEM-based drainage basin delineation, International Journal of Remote Sensing, 26 (14) (2005), pp. 3085-3102
188. Oksanen J., T. Sarjakoski, Uncovering the statistical and spatial characteristics of fine toposcale DEM error, International Journal of Geographical Information Science, 20 (4) (2006), pp. 345-369
189. Pavlis., N. K Correction to «The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)» / N. K. Pavlis et al. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118, May 9, 2013. – №5, c. 2633.
190. Polidori L., J. Chorowicz, R. Guillande, Description of terrain as a fractal surface, and application to digital elevation model quality assessment, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 57 (1991), pp. 1329-1332
191. Qiang, Y. Visibility analysis of oceanic blue space using digital elevation models/ Y. Qiang, S. Shen, Q. Chen // Landscape and Urban Planning. – 2019. - Vol.181. – P. 92-102.
192. Quantum GIS. User Guide – Switzerland : QGIS Development Team, 2013. – 285 p.
193. Raaflaub L.D., M.J. Collins, The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters, Environmental Modelling and Software, 21 (5) (2006), pp. 710-732

194. Rajasekhar, M. Data on comparative studies of lineaments extraction from ASTER DEM, SRTM, and Cartosat for Jilledubanderu River basin, Anantapur district, A.P, India by using remote sensing and GIS / M. Rajasekhar, G. Raju, R. Raju, M. Ramachandra, B. Kumar // Data in Brief. – 2018. - Vol.20. – P. 1676-1682.
195. Ramires E. Shuttle Radar Topography Mission, The Mission to Map the World [Online]: Jet Propulsion Laboratory NASA, California Institute of Technology. [Online] Eric Ramirez, 2014. – Режим доступа: URL. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.
196. Raster. QGIS User Guide. [Online] 1999. – Режим доступа: URL. https://docs.qgis.org/testing/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/raster_tools.html#raster-layer-statistics.
197. RavibabuM.V., Kamal Jain, S.P. Singh, N.J. Meeniga, Accuracy improvement of ASTERGDEM stereo satellite generated DEM using texture filter, Geo-spatial Inform Sci, 13 (4) (2010), pp. 257-262
198. Raymond, N. C. Runoff Response to Basin Parameters in Southeastern Nigeria. Geografiska Annaler / N. C. Raymond, Anyadike and Phillip, O. Phil-Eze // Series A, Physical Geography, 1989. - №1/2(71). – P. 75-84.
199. Rees W.G., The accuracy of Digital Elevation Models interpolated to higher resolutions, International Journal of Remote Sensing, 21 (2000), pp. 7-20
200. Reuter, H. I. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data / H. I. Reuter, A. Nelson, A. Jarvis // International Journal of Geographic Information Science, 2007 - Bristol, PA, USA : Taylor & Francis, Inc. - №9. – P. 983-1008.
201. Robinson et al., 2014, N. Robinson, J. Regetz, R.P. Guralnick, EarthEnv-DEM90: a nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data, ISPRS J. Photogram. Remote Sens., 87 (2014), pp. 57-67.
202. Sadeghi, Y. Mapping boreal forest biomass from a SRTM and TanDEM-X based on canopy height model and Landsat spectral indices / Y. Sadeghi, B. Onge, B. Leblon, J. Prieur, M. Simard// International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2018. - Vol.68. – P. 202-213.
203. Sampson et al., 2015, C.C. Sampson, A.M. Smith, P.D. Bates, J.C. Neal, A. Lorenzo, J.E. Freer, A high-resolution global flood hazard model, Water Resour. Res., 51 (9) (2015), pp. 7358-7381

204. SAS.Planet. SASGIS. [Online]: Веб-картография и навигация, 2007-2012. - SAS Group . - Режим доступа: URL. <http://sasgis.ru/sasplaneta/>.
205. Schumann et al., 2014, G.J.P. Schumann, P.D. Bates, J.C. Neal, K.M. Andreadis, Technology: fight floods on a global scale, *Nature*, 507 (7491) (2014), p. 169
206. Schumm, S. A. The Relation of Drainage Basin Relief to Sediment Loss / S. A. Schumm // *Internat. Assoc. Sci. Hyd. Pub.* 1954. - №36. – P. 216-219.
207. Schut G., Review of interpolation methods for digital terrain models, *The Canadian Surveyor*, 30 (1976), pp. 389-412
208. Shortridge, A. Spatial structure and landscape associations of SRTM error / A. Shortridge, J. Messina// *Remote Sensing of Environment*. – 2011. - Vol.115. – P. 1576-1587.
209. Sibson, R. A Brief Description of Nearest Neighbor Interpolation, Chapter 2, In V. Barnett *Interpolating Multivariate Data* / R. Sibson, // Chichester:John Wiley & Sons, New York, 1981. – P. 21-36.
210. Simard et al., 2011, M. Simard, N. Pinto, J.B. Fisher, A. Baccini, Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 116 (G4) (2011)
211. Simone Tarquini, Stefano Vinci, Massimiliano Favalli, Fawzi Doumaz, Alessandro Fornaciai, Luca Nannipieri. Release of a 10-m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyph-mode exploration via the web. *Computers & Geosciences* - Volume 38, Issue 1, January 2012, Pages 168-170
212. Singh S.J. K., M.B. Dyugеров, B.H. Raup, R.G. Barry, Space-based mapping of glacier changes using ASTERGDEM and GIS tools, *IEEE Trans Geosci Rem Sens*, 42 (2004), pp. 2177-2183
213. Sokolov, A. A. Interrelationship between Geomorphological Characteristics of a drainage basins and the streams / A. A. Sokolov // *Soviet Hydrology Selected Papers*, 1969. - №1. – P.16-22.
214. Song, C. A comprehensive geospatial database of nearly 100 000 reservoirs in China / C. Song, C. Fan, J. Zhu, J. Wang, Y. Sheng, K. Liu, T. Chen, P. Zhan, S. Luo, C. Yuan, L. Ke // *Earth System Science Data*. – 2022. – №14. – P. 4017-4034.
215. Stevens N.F., H. Garbeil, J.P. Mouginis-Mark, NASA EOS ASTERGDEM: volcanic topographic mapping and capability, *Rem Sens Environ*, 90 (2004), pp. 405-414

216. Strahler, A. R. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology / A. R. Strahler // Transactions, American Geophysical Union. - Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 1957. - №6(38). – P. 913-920.
217. Summerfield, M A. Global Geomorphology / M A. Summerfield. - Routledge; 1 edition (2 April 1991) : Pearson Education Ltd, 1991. - 537 p. ISBN 978-0-582-30156-6.
218. Tachikawa et al., 2011a, Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., Iwasaki, A., 2011. Characteristics of ASTER GDEM version 2. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International, IEEE, pp. 3657–3660.
219. Tachikawa et al., 2011b, Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., 2011. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. ASTER GDEM Validation Team <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf>.
220. Tachikawa, T., et al. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. August 31 [Online]: 2011. – Режим доступа: URL. <https://www.researchgate.net/>.
221. Takaku et al., 2016, J. Takaku, A. Iwasaki, T. Tadono, Adaptive filter for improving quality of ALOS PRISM DSM, Proc. IEEE Geosci. Remote Sens. Symposium (IGARSS) (2016), pp. 5370-5373
222. Tan, Q. Comparative Analysis of Spatial Interpolation Methods: an Experimental Study / Q. Tan, X. Xu // Sensors&Transducers. – 2014. - Vol.165. – P. 155-163.
223. Taud, H. DEM generation by contour line dilation / H. Taud, J. Parrot, R. Alvarez // Computers & Geosciences, 1999. – P. 775-783.
224. Walker et al., 2007, W.S. Walker, J.M. Kelndorfer, L.E. Pierce, Quality assessment of SRTM C- and X-band interferometric data: implications for the retrieval of vegetation canopy height, Remote Sens. Environ., 106 (4) (2007), pp. 428-448
225. Walsh S., D. Lightfoot, D. Butler, Recognition and assessment of error in geographic information systems, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 53 (1987), pp. 1423-1430
226. Wang and Wang, 2015, L. Wang, K. Wang, Impacts of DEM uncertainty on estimated surface solar radiation and extracted river network, Bull. Am. Meteorol. Soc., 96 (2) (2015), pp. 297-304

227. Wang Bin, Wenzhong Shi, Eryong Liu, Robust methods for assessing the accuracy of linear interpolated DEM, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 34, February 2015, Pages 198-206
228. Ware, J. M. A procedure for automatically correcting invalid flat triangles occurring in triangulated contour data / J. M. Ware // *Computers & Geosciences*, 1998. - №2. – P. 141-150.
229. Watson D., *Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data*, Pergamon Press, London (1992), pp. 120-123
230. Weber D., E. Englund, Evaluation and comparison of spatial interpolators II, *Math. Geol.*, 26 (1994), pp. 589-603
231. Weber D., E. Englund, Evaluation and comparison of spatial interpolators, *Math. Geol.*, 24 (1992), pp. 381-391
232. Wise S.M., Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours, *Hydrological Processes*, 14 (11–12) (2000), pp. 1909-1929
233. Wise S.M., Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model, *Computers & Geosciences*, 33 (10) (2007), pp. 1351-1365
234. Wise S.M., The effect of GIS interpolation errors on the use of DEMs in geomorphology, S.N. Lane, K.S. Richards, J.H. Chandler (Eds.), *Landform Monitoring, Modeling and Analysis*, Wiley, Chichester (1998), pp. 139-164
235. Wise Stephen, Cross-validation as a means of investigating DEM interpolation error, *Computers & Geosciences*, Volume 37, Issue 8, August 2011, Pages 978-991
236. Wise S.M., The effect of GIS interpolation errors on the use of DEMs in geomorphology, S.N. Lane, K.S. Richards, J.H. Chandler (Eds.), *Landform Monitoring, Modeling and Analysis*, Wiley, Chichester (1998), pp. 139-164
237. Xu Min, Li Chen, Qihui Wu, Dongfeng Li, Morph- and hydro-dynamic effects toward flood conveyance and navigation of diversion channel, *International Journal of Sediment Research*, Volume 31, Issue 3, September 2016, Pages 264-270
238. Yafeng L., Xingang X., Wenbiao W., Yaohui Z., Guijun Y., Xiaodong Y., Yang M., Xiangtai J., Hanyu X. Hyperspectral Estimation of Chlorophyll Content in Grape Leaves Based on Fractional-Order Differentiation and Random Forest Algorithm. *Remote Sens.* 2024, 16(12), 2174; <https://doi.org/10.3390/rs16122174>.

239. Yamazaki et al., 2017, D. Yamazaki, D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J.C. Neal, et al., A high-accuracy map of global terrain elevations, *Geophys. Res. Lett.*, 44 (11) (2017), pp. 5844-5853
240. Yang et al., 2011, L. Yang, X. Meng, X. Zhang, SRTM DEM and its application advances, *Int. J. Remote Sens.*, 32 (14) (2011), pp. 3875-3896
241. Yue Linwei, Huanfeng Shen, Liangpei Zhang, Xianwei Zheng, Fan Zhang, Qiangqiang Yuan, High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 123, January 2017, Pages 20-34
242. Yue T.-X., C.-F. Chen, B.-L. Li, A high-accuracy method for filling voids and its verification, *Int. J. Remote Sens.*, 33 (9) (2012), pp. 2815-2830
243. Zabota, B. Influence of digital elevation model resolution on rockfall modelling / B. Zabota, B. Repe , M. Kobal // *Geomorphology*. – 2019. - Vol.328. – P. 183-195.
244. Zandbergen P.A., Positional accuracy of spatial data: non-normal distributions and a critique of the national standard for spatial data accuracy, *Transactions in GIS*, 12 (1) (2008), pp. 103-130
245. Zandbergen, 2008, P. Zandbergen, Applications of shuttle radar topography mission elevation data, *Geography Compass*, 2 (5) (2008), pp. 1404-1431
246. Zhao et al., 2011, S. Zhao, W. Cheng, C. Zhou, X. Chen, S. Zhang, Z. Zhou, H. Liu, H. Chai, Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: an example in the Loess Plateau and North China Plain of China, *Int. J. Remote Sens.*, 32 (23) (2011), pp. 8081-8093
247. Zhou Q.M., X.J. Liu, Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties, *Computers & Geosciences*, 30 (4) (2004), pp. 369-378
248. Zhou Q.M., X.J. Liu, Error assessment of grid-based flow routing algorithms used in hydrological models, *International Journal of Geographical Information Science*, 16 (8) (2002), pp. 819-842
249. Zimmerman D., C. Pavlik, A. Ruggles, M. Armstrong, An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting, *Math. Geol.*, 31 (1999), pp. 375-390
250. Zlatanova, A. *GeoSpatial Theory, Processing and Applications* / A. Zlatanova, A A. Rahman, M. Pilonk // *3d Gis: Current status and perspectives*. – Ottawa : IAPRS, 2002. - №34 – P. 66-71.

Копии актов внедрения

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
(РОСВОДРЕСУРСЫ)**

**ВЕРХНЕ-ВОЛЖСКОЕ БАССЕЙНОВОЕ
ВОДНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА
ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
Отдел водных ресурсов
по Нижегородской области**

603001, г. Н.Новгород, ул. Рождественская, д.38

т. (831) 430-55-77 ф. (831) 430-55-77

E-mail: otvodnn@vvbv.kis.ru

В диссертационный совет Д 999.048.02

от _____ № _____

на _____ от _____

Акт

**О практическом применении результатов диссертационного исследования
Коротина А.С на тему: «Повышение точности и достоверности трехмерных
моделей рельефа местности при создании ГИС малых рек»**

Настоящим актом удостоверяется, что Верхне-Волжское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов изучило теоретические и практические (прикладные) разработки и рекомендации диссертационного исследования Коротина А.С.

Результаты диссертационного исследования Коротина А.С. могут быть использованы в деятельности Верхне-Волжского БВУ при планировании мероприятий по предотвращению негативного воздействия вод и ликвидации его последствий в отношении водных объектов, находящихся в федеральной собственности и расположенных на территориях двух и более субъектов Российской Федерации, в зоне деятельности территориального органа, а также при осуществлении мероприятий по охране водоемов, которые полностью расположены на территориях соответствующих субъектов Российской Федерации, в соответствии с перечнем таких водохранилищ, установленным Правительством Российской Федерации, предотвращению их загрязнения, засорения и истощения вод, осуществление мер по ликвидации последствий указанных явлений в зоне деятельности территориального органа.

Результаты диссертационного исследования имеют значение для формирования сведений государственного мониторинга водных объектов и в

дальнейшем государственного водного реестра. Применение геоинформационных технологий и комплексных систем и могут быть использованы при разработке автоматизированных систем сбора, обработки, анализа, хранения и выдачи информации о состоянии и режиме водных объектов, водных ресурсах, а также установлении границ водоохранных зон и границ прибрежных защитных полос водных объектов, границ зон затопления и подтопления в отношении водохранилищ, которые полностью расположены на территориях соответствующих субъектов Российской Федерации (в частности, на территории Нижегородской области в соответствии со статьей 67.1 Водного кодекса Российской Федерации, Градостроительным кодексом Российской Федерации, постановлением Правительства Российской Федерации от 18 апреля 2014 года № 360 «Об определении границ зон затопления, подтопления», поручением Президента Российской Федерации от 10 сентября 2014 года № Пр-2166) и которые входят в перечень водохранилищ, установленный Правительством Российской Федерации, в зоне деятельности Верхне-Волжского БВУ.

Заместитель руководителя
Верхне-Волжского БВУ



Л.А. Махова



**Министерство
экологии
и природных ресурсов
Нижегородской области**

Кремль, корп. 14, г. Нижний Новгород, 603082
тел. 435-63-35, факс 435-63-36
e-mail: official@eco.kreml.nnov.ru

06.01.18 № 319-04-6518

на № _____ от _____

Об акте применения

В диссертационный совет
Д 999.048.02
ФГБОУ ВО

Нижегородского государственного
архитектурно-строительного
университета

Акт

о практическом применении полученных результатов
диссертационного исследования Коротина А.С на тему «Повышение точности и
достоверности трехмерных моделей рельефа местности при создании ГИС
малых рек»

Настоящим актом удостоверяется, что в нашем Министерстве тщательно изучены теоретические и практические (прикладные) разработки и рекомендации диссертационного исследования Коротина А.С., в том числе проработанными моделями геоинформационных систем бассейновых речных систем с описанием их основных, необходимых и достаточных для рациональной работы составных частей и внутрисистемных связей. Результаты диссертационного исследования Коротина А.С. будут использованы Министерством при разработке программ комплексной оценки состояния экосистемы в границах Нижегородской области, а также при оценке рисков, связанных с развитием и дальнейшей эксплуатацией Чебоксарской ГЭС, в части строительства низконапорного гидроузла и определения пространственного положения площадей зон затопления и подтопления территорий. Кроме того, результат имеют практический интерес в плане реализации работ по определению границ зон затопления, подтопления на территории Нижегородской области в соответствии со статьей 67.1 Водного кодекса Российской Федерации, Градостроительным кодексом Российской Федерации,

постановлением Правительства Российской Федерации от 18 апреля 2014 года № 360 «Об определении границ зон затопления, подтопления», поручением Президента Российской Федерации от 10 сентября 2014 года № Пр-2166, в целях предотвращения негативного воздействия вод, снижения потерь от чрезвычайных ситуаций, вызванных затоплением, подтоплением при подготовке проектов границ зон затопления, подтопления на территории Нижегородской области.

Первый заместитель министра



Н.Н.Мочалина

ООО «АЭРОГЕОДЕЗИЯ»

Юридический адрес: 603024, г. Нижний Новгород, ул. Полтавская, д. 14, помещение 009
 Р/с 40702810903000010705 в ПРИВОЛЖСКИЙ ф-л ПАО "ПРОМСВЯЗЬБАНК"
 (филиал ПАО «Промсвязьбанк») г. НИЖНИЙ НОВГОРОД: р/с 40702810903000010705
 к/с 30101810700000000803; БИК 042202803; ИНН 5258122838; КПП 525801001; ОГРН 1155258003526

02.07.2018 № 05/7-AB
 На № _____ от _____

В диссертационный совет
 Д 999.048.02
 ФГБОУ ВО ННГАСУ

Акт

О практическом применении результатов
 диссертационного исследования Коротина А.С

Настоящим актом удостоверяется, что общество с ограниченной ответственностью ООО «АЭРОГЕОДЕЗИЯ» изучило результаты диссертационного исследования Коротина А.С. в области геометрического моделирования поверхностей рельефа и их корректуры.

Результаты диссертационного исследования имеют непосредственное прикладное значение для формирования цифровых моделей рельефа местности с использованием материалов дистанционного зондирования земли открытого пользования. Предлагаемые методы по оценки точности и корректуре моделей рельефа имеют важное значение для развития направлений в области геодезии, картографии и дистанционного зондирования земли в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Результаты диссертационного исследования Коротина А.С. будут использованы в деятельности ООО «АЭРОГЕОДЕЗИЯ» при осуществлении геодезической и картографической деятельности для составлений картографических материалов открытого пользования и выполнении инженерных изысканий при проектировании крупных объектов. Предложенная процедура создания изображений-анаглифов картографического содержания имеет прикладное значение при проведении рекогносцировочных работ на объектах изысканий при составлении планов полетов с применением беспилотных летательных аппаратов.

Генеральный директор
 ООО «АЭРОГЕОДЕЗИЯ»



/ Королев Н.Ю.

Копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015660773

«Volume Graphics Analyzer» (VolGA)

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ) (RU)*

Авторы: *Коротин Антон Сергеевич (RU),
Попов Евгений Владимирович (RU)*



Заявка № 2015616338

Дата поступления 07 июля 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 октября 2015 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

Актуализация данных и определение периода их обновлений

Важным вопросом при создании ГИС(б) является актуальность данных и возможность их обновления. Учитывая столь плотную связь слоев ГИС-систем с объектами реальности, целесообразно определить какие из материалов должны обновляться и с какой периодичностью. Природно-территориальный комплекс бассейна (рис. В.1) может служить описывающим временным базисом. Природно-территориальный комплекс бассейна может представить в виде слоеной пирамиды, в которой эволюционные процессы протекают с определенной скоростью, исчисляемой от сотен и миллионов лет до нескольких дней и часов (рис. В.1) [59].

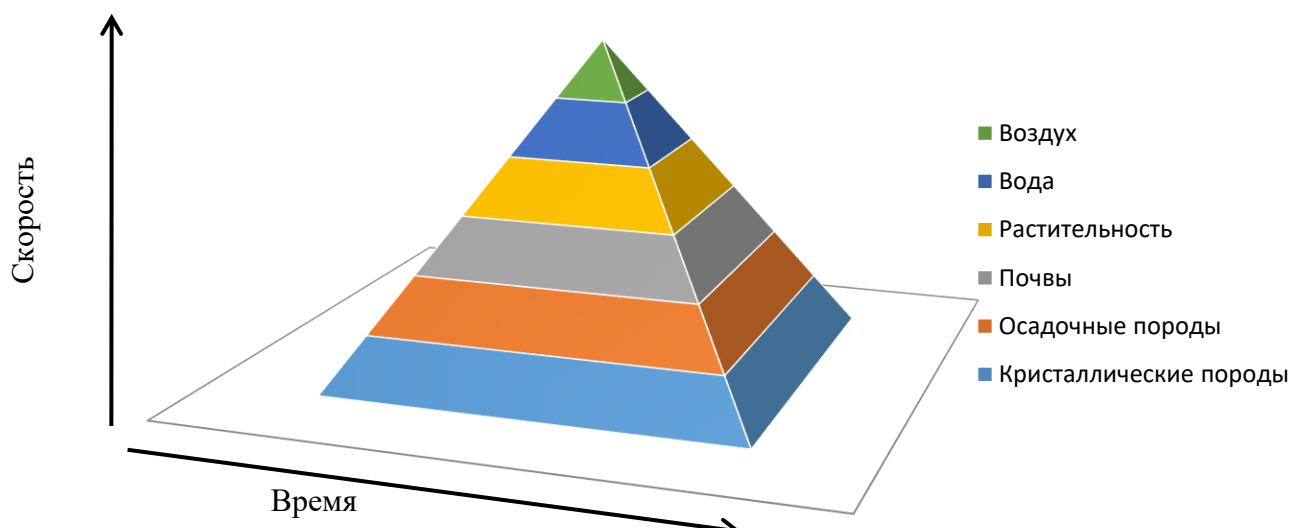


Рисунок В.1 – Единство природного территориального комплекса

Благодаря использованию разновременных данных можно передать динамику и эволюцию явлений за любой отрезок времени. Например, используя топографические карты местности можно проследить эволюцию объектов в пределах нескольких десятилетий, опираясь на номенклатурный период обновления картографических материалов. Если использовать космические снимки, то время отслеживания динамических изменений сокращается до нескольких часов, определенных периодом обращения ИСЗ. Кроме технических возможностей, стоит учитывать – «различные явления имеют различные характерные интервалы пространства-времени, в рамках которых проявляются особенности их структуры и динамики» [1, с. 112]. На рис. В.2 приведен график зависимости способности

передачи тех или иных изменений явлений во времени и пространстве, составленный по материалам российских и зарубежных исследователей [13, 55, 62]

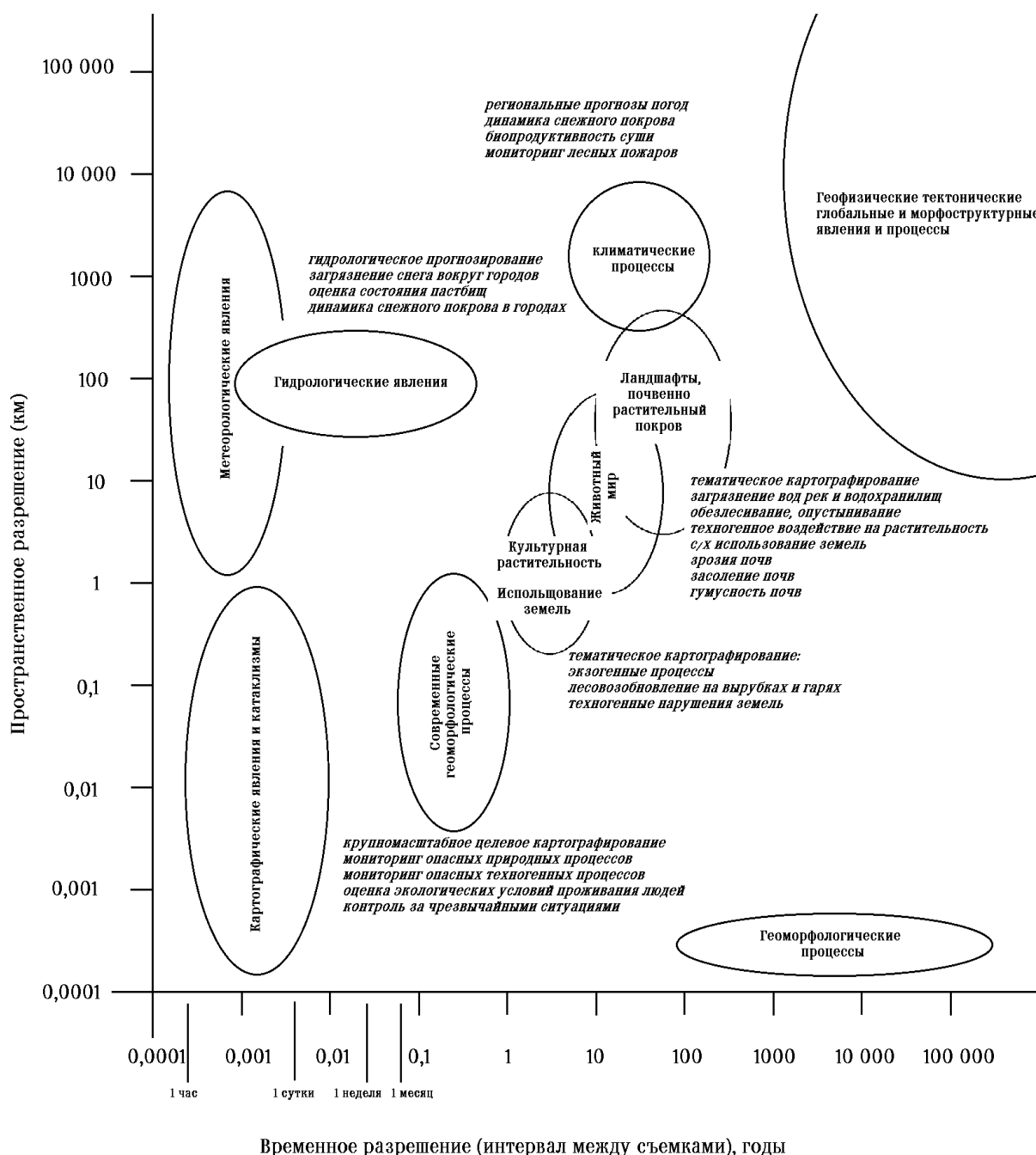


Рисунок В.2 – Соотношение между пространственным и временным разрешением топографических произведений и КС и решаемые задачи.

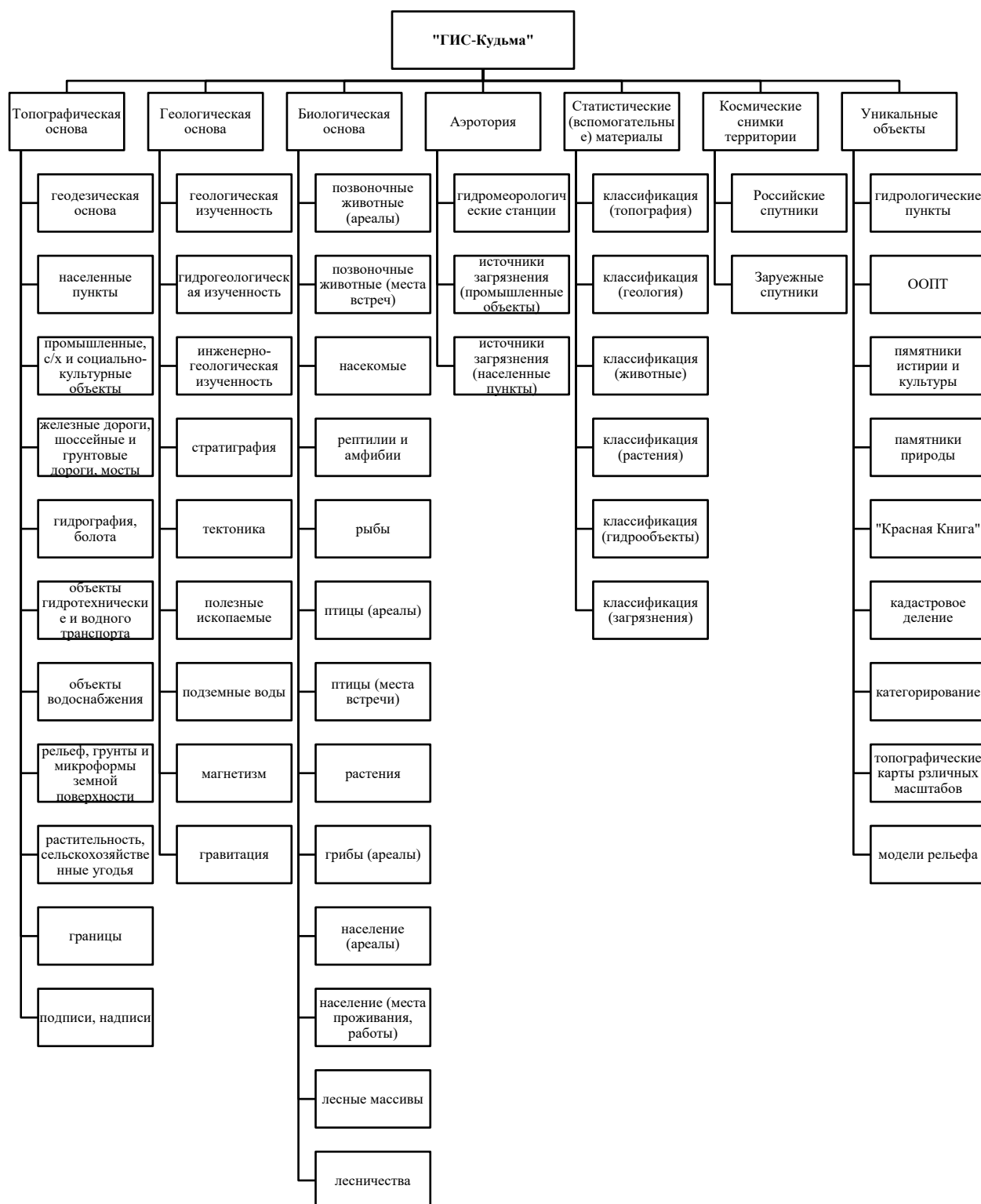
«Изложенные изображения позволяют говорить о существовании определенных масштабно-информационных (геоинформационных) уровней геоизображений, т.е. некоторых интервалов, в пределах которых они наилучшим образом сочетаются, сопоставляются и дополняют друг друга» [1, с. 114].

**Коэффициенты, только ограничивающие функцию интерполяционного полинома
Лагранжа при значении переменной «0»**

№ пиксела по схеме	Функция (числитель)	Значение функции при «0»
1	$(x+1)=x+1$	$\frac{0! \times 1!}{2 \times 1!}$
2	$(x+1)(x-1)(x-2)=x^3-2x^2-x+2$	$\frac{1! \times 2!}{2 \times 3!}$
3	$(x+2)(x+1)(x-1)(x-2)(x-3)=x^5-3x^4-5x^3+15x^2+4x-12$	$\frac{2! \times 3!}{2 \times 5!}$
4	$(x+3)(x+2)(x+1)(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)=x^7-4x^6-14x^5+56x^4+49x^3-196x^2-36x+144$	$\frac{3! \times 4!}{2 \times 7!}$
5	$(x+4)(x+3)(x+2)(x+1)(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)(x-5)=x^9-5x^8-30x^7+150x^6+273x^5-1365x^4-820x^3+4100x^2+576x-2880$	$\frac{4! \times 5!}{2 \times 9!}$
6	$(x+5)(x+4)(x+3)(x+2)(x+1)(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)(x-5)(x-6)=x^{11}-6x^{10}-55x^9+330x^8+1023x^7-6138x^6-7645x^5+45870x^4+21076x^3-126456x^2-14400x+86400$	$\frac{5! \times 6!}{2 \times 11!}$
7	$(x+6)(x+5)(x+4)(x+3)(x+2)(x+1)(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)(x-5)(x-6)(x-7)=x^{13}-7x^{12}-91x^{11}+637x^{10}+3003x^9-21021x^8-444473x^7+311311x^6+296296x^5-2074072x^4-773136x^3+5411952x^2+518400x-3628800$	$\frac{6! \times 7!}{2 \times 13!}$
8	$(x+7)(x+6)(x+5)(x+4)(x+3)(x+2)(x+1)(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)(x-5)(x-6)(x-7)(x-8)=x^{15}-8x^{14}-140x^{13}+1120x^{12}+7462x^{11}-59696x^{10}-191620x^9+1532960x^8+2475473x^7-19803784x^6-152916406x^5+122333120x^4+38402064x^3-307216512x^2-25401600x+203212800$	$\frac{7! \times 8!}{2 \times 15!}$
9	$(x+8)(x+7)(x+6)(x+5)(x+4)(x+3)(x+2)(x+1)(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)(x-5)(x-6)(x-7)(x-8)(x-9)=x^{17}-9x^{16}-204x^{15}+1836x^{14}+16422x^{13}-147798x^{12}-669188x^{11}+6022692x^{10}+14739153x^9-132652377x^8-173721912x^7+1563497208x^6+1017067024x^5-9153603216x^4-2483133696x^3+22348203264x^2-1625702400x-14631321600$	$\frac{8! \times 9!}{2 \times 17!}$
10	$(x+9)(x+8)(x+7)(x+6)(x+5)(x+4)(x+3)(x+2)(x+1)(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)(x-5)(x-6)(x-7)(x-8)(x-9)(x-10)=x^{19}-10x^{18}-285x^{17}+2850x^{16}+32946x^{15}-329460x^{14}-1999370x^{13}+19993700x^{12}+68943381x^{11}-689433810x^{10}-1367593305x^9+13675933050x^8+15088541896x^7-150885418960x^6-84865562640x^5+848655626400x^4+202759531776x^3-2027595317760x^2-131681894400x+1316818944000$	$\frac{9! \times 10!}{2 \times 19!}$

Геоинформационная система бассейна водного объекта

Модель проекта



Требования, предъявляемые к модели бассейновой гидрографической сети

Требования, предъявляемые к модели бассейновой гидрографической сети по [7, 109]:

1. За длину реки принимается длина средней линии объекта от истока до устья.
2. За исток и устье принимаются крайние точки течения реки.
3. Если начало реки дают родник, ключ, источник и т.д., за исток реки следует считать точку положения этого ключа, родника, источника и т.д.
4. Если река берет начало из болота или иного водного объекта, за исток реки следует принимать то место, где образуется заметный водный поток, в т.ч. временный и пересыхающий (обычно за исток принимается место выхода потока из болота).
5. Если река вытекает из озера, за исток её следует принимать место выхода реки из озера; длина озера в длину реки не включается.
6. Если реке дают начало талые воды ледника, за исток реки принимается место выхода из-под ледника водного потока; некоторое изменение положения истока в течение ряда лет практически на длине реки не скажется.
7. Если река образуется из двух и более рек или ручьёв, не имеющих собственных названий (необязательно, чтобы название реки было подписано на карте), за исток реки принимается исток самого длинного из этих ручьёв или рек.
8. Если река образуется от слияния двух или более рек, или ручьёв, имеющих собственные названия, отличные от названия реки, за начало реки принимается место слияния этих рек или ручьёв; каждый из таких ручьёв рассматривается как самостоятельная единица.
9. Если река впадает в море, озеро или реку одним рукавом, за устье следует считать линию, соединяющую наиболее выдавшиеся точки на обоих берегах, с тем, чтобы линия устья составляла с линиями берегов плавную линию.
10. Если река впадает в море, озеро или реку несколькими рукавами, за устье реки следует считать устье самого мощного из этих рукавов (хотя бы и менее длинного, чем другие); если нельзя установить, какой, из рукавов самый мощный, за устье реки принимается устье самого длинного из них.

11. Если река впадает в море или озеро, образуя при этом дельту, за устье реки следует считать устье самого мощного рукава дельты (или самого- длинного, если мощность рукавов не известна) при выходе его из компактной дельты.

12. Если река образует при своём впадении в море эстуарий, за устье реки следует считать линию, отделяющую эстуарий от моря; таким образом, длина эстуария включается в длину реки.

13. Если река образует при своём впадении в море лиман, за устье реки принимается протока, соединяющая лиман с морем; лиман также включается в длину реки.

14. Если река впадает в бухту, залив, лагуну или фиорд, за устье реки следует принимать место впадения реки в эти объекты.

15. Если река в нижнем своём течении полностью разбирается на орошение, за устье реки принимается окончание самого длинного и мощного рукава или канала, хотя бы временно и не заполняемого водою.

16. Если река в своём течении разделяется на рукава, средняя линия проводится по середине самого мощного из рукавов, а для судоходной реки – по середине судоходного рукава; переход средней линии реки в среднюю линию рукава должен быть плавным, без резких углов.

17. Для рек, делящихся на много рукавов и проток (горные реки), из которых главный рукав или главную протоку не представляется возможным наметить даже на крупномасштабных картах, средняя линия проводится по середине всего русла; это ведёт к некоторому уменьшению длины реки.

18. В том случае, когда река проходит через озеро, в длину реки включается также длина озера, которая, если возможно, исчисляется по его средней линии; возможны и другие решения, вызываемые конфигурацией озера и положением мест впадения и выхода из него реки.

19. Если часть течения реки канализована, средняя линия проводится по каналу, независимо от того, существует ли параллельно ему естественное русло реки.

20. Если река частью своего течения проходит под землёй, средняя линия должна соединять по прямой средние точки концов наземных частей реки.