

Российская академия наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр комплексного изучения
Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук
Институт геодинамики и геологии

На правах рукописи

Минеев

МИНЕЕВ АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ
АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

25.00.36 – Геоэкология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук
Ю.Г. Кутинов

Архангельск – 2020

Содержание

	Стр.
Введение	4
Глава 1 Физико-географическая и геологическая характеристика района исследований.....	10
Глава 2 Создание цифровой модели рельефа Архангельской области, соответствующей геологическому строению и геоморфологии региона	27
2.1 Технологии создания ЦМР.....	32
2.2 Глобальные цифровые модели рельефа.....	36
2.3 Выбор базовой ЦМР для геоэкологического районирования территории	51
2.4 Выбор геоинформационной системы оптимальной для построения цифровой модели рельефа и расчета параметров рельефа Архангельской области.....	55
2.5 Подготовка цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ЦМР ASTER GDEM v2.....	61
2.5.1 Подготовка набора данных GMTED2010	65
2.5.2 Заполнение недостающих данных в ASTER GDEM данными GMTED2010.....	67
2.5.3 Статистический анализ для обнаружения аномальных значений	68
2.6 Заполнение впадин	78
2.6.1 Метод заполнения впадин L. Wang и H. Liu	79
2.7 Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований	85
Глава 3 Выбор геоморфометрических параметров рельефа и методик их расчета	92
3.1 Геоморфометрия.....	92

3.1.1	Геометрические параметры рельефа	95
3.2	Выбор геоморфометрических параметров для геоэкологического районирования территории	97
3.3	Генерализация данных	120
3.3.1	Кластерный анализ	126
Глава 4	Геоэкологическое районирование исследуемой территории	133
4.1	Районирование территории на основе кластерного анализа углов наклона, LS-фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности	134
Глава 5	Репрезентативные участки для наземного мониторинга загрязняющих веществ	144
5.1	Бассейновое районирование территории для геоэкологической оценки водосборных площадей.....	145
5.2	Рельеф и эрозионные процессы на территории Архангельской области.....	148
5.3	Геоэкологическое районирование исследуемой территории по степени развития эрозионных и аккумулятивных процессов.....	151
	Заключение.....	158
	Список литературы.....	162

Введение

Актуальность темы. Изучение рельефообразующих процессов в лесных сообществах связано, в основном, с хозяйственным освоением территорий, и лишь небольшое количество работ посвящено проявлению эрозионных процессов в не затронутых антропогенной деятельностью северотаежных ландшафтах. Учитывая площадь лесного покрова исследуемого региона, вопрос этот имеет приоритетное значение.

Эрозионные процессы в естественных северотаежных ландшафтах Севера Русской плиты протекают достаточно медленно и находят слабое отражение в формах рельефа. Однако ситуация коренным образом изменяется в результате хозяйственного освоения территорий. Кроме того, происходящие глобальные изменения климата, особенно ярко выраженные в высоких широтах, могут являться первопричиной или триггером развития различных генетически связанных эрозионных процессов.

Получившие в последнее время широкое развитие геоинформационные (ГИС) технологии, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и цифровые модели рельефа (ЦМР) сделали возможным решение чрезвычайно сложных фундаментальных и прикладных задач геоэкологии, ландшафтной экологии и природопользования, связанных с количественным анализом картографической информации и построением моделей различных компонентов ландшафтов.

На территорию Архангельской области до сих пор не было информации о рельефе, собранной из детальных данных ДЗЗ, должным образом подготовленной и пригодной для геоэкологического районирования. Обычно ЦМР строились на основе топокарт м-ба 1:1000000 или на отдельные районы м-ба 1: 200000 (Гофаров и др., 2006), занимающие не более 10% исследуемой территории. И, соответственно, не проводилось комплексной геоэкологической оценки состояния территории по данным ДЗЗ. В связи с этим актуальным становится направление, связанное с

проведением геоэкологического районирования территории на основе цифрового моделирования рельефа.

Использование цифрового моделирования рельефа дает возможность создания тематических карт важнейших геоморфометрических параметров и на их основе карт потенциальной эрозионной опасности, направлений поверхностного стока, геохимической миграции элементов, устойчивости ландшафтов, преобладающий режим (аккумуляционный, эрозионный) и т.п.

Несмотря на бурное развитие цифрового моделирования рельефа, остается целый ряд вопросов: 1) насколько пригодно цифровое моделирование для комплексного геоэкологического районирования, особенно равнинных территорий, в первую очередь, древних платформ; 2) выбор цифровой модели рельефа, отражающей основные черты геологического, геоморфологического, тектонического, ландшафтного и др. региона; 3) методика обработки ЦМР для среднемасштабного геоэкологического районирования больших площадей.

Цель работы. Провести геоэкологическое районирование территории Архангельской области на основе анализа геоморфометрических параметров рельефа.

В соответствии с целью были поставлены и решены следующие задачи:

- выделить основные черты геологического строения региона, определившие его геоморфологию;
- обосновать необходимость количественного анализа рельефа (геоморфометрического) для геоэкологического районирования и мониторинга;
- создать цифровую модель рельефа для геоэкологического районирования исследуемого региона;
- определить оптимальный набор геоморфометрических параметров для выделения геоэкологических районов однотипных по эрозионно-аккумулятивным процессам;
- провести геоэкологическое районирование исследуемой территории;

- провести бассейновое районирование территории для геоэкологической оценки водосборных площадей;
- выделить участки, предрасположенные к накоплению загрязняющих веществ для осуществления наземного геоэкологического мониторинга.

Существо работы отражено в следующих защищаемых положениях:

1. Впервые созданная цифровая модель рельефа Архангельской области, соответствующая геологическому строению и геоморфологии региона, является количественной основой для геоэкологического районирования.

2. Определен оптимальный набор геоморфометрических параметров рельефа для геоэкологического районирования территории и разработана методика их анализа с использованием современных цифровых технологий.

3. В пределах Архангельской области по геоморфометрическим параметрам выделены геоэкологические районы, отличающиеся однотипными эрозионно-аккумулятивными процессами, отражающие геолого-геоморфологическое строение и геодинамический режим региона.

4. В выделенных геоэкологических районах оконтурены зоны с разной степенью интенсивности процессов эрозии, транзита и накопления осадков, и участки, предрасположенные к аккумуляции загрязняющих веществ для последующего проведения наземного мониторинга.

Фактический материал. Использована 91 сцена глобальной цифровой модели ASTER GDEM v2 с разрешением 1 угловая секунда (~30 метров). Размер сцены 4,100 на 4,200 элементов (вся территория Архангельской области, 12734342 ячейки). Выборка была дополнена 1 сценой GMTED2010 с искусственно уменьшенным размером ячейки до 1 угловой секунды.

Были подготовлены 20 карт в трех разрешениях и 8 карт в одном разрешении (в общем 68 карт).

Научная новизна. В ходе исследования на территорию Архангельской области впервые была создана детальная гидрологически корректная

цифровая модель рельефа для геоэкологического районирования региона и разработана методика подготовки ЦМР, которая может быть применена и для других равнинных северных регионов Российской Федерации. Выбраны, рассчитаны и проанализированы основные геоморфометрические параметры рельефа региона, определяющие развитие эрозионных процессов. Созданы карты геоэкологического районирования территории и развития эрозионных процессов. Выделены участки, предрасположенные к аккумуляции загрязняющих веществ для последующего проведения наземного мониторинга.

Практическая значимость. Осуществление хозяйственной деятельности в северотаежных районах Архангельской области сталкивается с серьезными трудностями в плане почти полного отсутствия актуальной, точной геопространственной информации об опасных процессах и явлениях. Получение такой информации о современном состоянии рельефообразующих процессов, характере их пространственного распределения, интенсивности развития является крайне необходимым для обеспечения промышленной и экологической безопасности в процессе хозяйственного освоения региона.

Работа выполнялась по темам ФНИР «Изучение структуры и динамики абиотических факторов и оценка их влияния на окружающую среду северных регионов» (№ 01201256211), «Изучение межгеосферных процессов в районах тектонических структур и узлов их пересечений в геологических условиях древних платформ на примере Архангельской области» (№ АААА-А18-118012390305-7); была поддержана: программой Президиума РАН «Научные основы инновационных энергоресурсосберегающих экологически безопасных технологий оценки и освоения природных и техногенных ресурсов», проект № 12-П-5-1009 «Фундаментальные основы экологически безопасных технологий освоения природных ресурсов западно-арктического сектора Российской Федерации» (№ 01201256211); Программой фундаментальных исследований УрО РАН «Арктика» (№ 12-5-3-002-АРКТИКА), проект «Геоэкологическое районирование арктических и

приарктических территорий РФ для рационального освоения Арктики» (№ 01201268728) и Грантом РФФИ-Арктика № 18-05-60024 «Анализ состояния природной среды равнинных территорий Арктической зоны РФ с использованием геоинформационных технологий и цифрового моделирования рельефа».

Апробация диссертации. Основные положения докладывались и обсуждались на: Всерос. конфер. с междунар. участием «Применение космических технологий для развития Арктических регионов» г. Архангельск, САФУ, 17-19.09.2013 г.; Всерос. открытых конфер. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 11-17 (2013-2019 гг.) г. Москва, ИКИ РАН; IX Северном социально-экологическом Конгрессе «Российский Север: перспективы, долгосрочные прогнозы, управление рисками» Архангельск, 26-27.09.2013 г.; Всерос. научн. конферен. с междунар. участием «Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI веке», Архангельск, АНЦ УрО РАН, 15-18.09.2014 г.; III Международном GIS-форуме «Интеграция геопространства – будущее информационных технологий», Москва, компания «Совзонд» 15-17.04.2015 г.; 4 и 6 Кудрявцевских чтениях «Глубинная нефть», Москва, 2015, 2018 гг.; XLVIII Тектоническом совещании «Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ», Москва, ОНЗ РАН, 2-6.02.2016 г.; II междунар. научн. конфер. «Природные ресурсы и комплексное освоение прибрежных районов Арктической зоны» Архангельск, ФЦКИА, 27-29.09.2016 г.; I Междунар. научно-практич. конфер. «География Арктических регионов 2017». СПб. РГПУ им. А. И. Герцена, 9-10.11.2017 г.; XIX и XXI Науч. конфер. Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых. М. ИГЭ РАН, 2017, 2019 гг.; XXVI и XXVII заседаниях Всерос. Междисц. семинара – конфер. геологического и географического факультетов МГУ имени М.В. Ломоносова «Система Планета Земля», г. Москва, 2018, 2019 гг.; VI междунар. научно-технич. конфер. «Актуальные

проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». г. Москва, ВНИЭМ. 24.05.2018 г.; VII междунар. конфер. «Евразия в кайнозойе. Стратиграфия, палеоэкология, культуры». г. Иркутск, 14-17.05.2018 г.; VI international scientific conference «Risks and Safety in Rapidly Changing World» Prague May 10-11, 2018; X Междунар. научно-практич. конфер. по проблемам снижения природных опасностей и рисков, Москва, 23-24 октября 2018 г. ИГЭ РАН, МЧС; Всерос. конфер. с междунар. участием II Юдахинские чтения «Проблемы обеспечения экологической безопасности и устойчивое развитие арктических территорий». г. Архангельск. ФИЦКИА РАН. 24-28 июня 2019 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 21 публикация: 2 монографии, 8 статей из списка ВАК (в т.ч. 1 статья из базы WoS, 5 статей из базы Scopus), 6 статей в рецензируемых журналах из списка РИНЦ, 15 статей в материалах и тезисах конференций.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (125 наименований, из них 52 зарубежных и 6 источников из Интернет-ресурсов). Общий объём: 174 страницы, включая 93 рисунка и 27 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность всем, кто оказывал помощь и поддержку в проведении исследований и в подготовке работы: научному руководителю, д.г.-м.н., гнс ФИЦКИА РАН Ю.Г. Кутинову; к.г.-м.н., внс ФИЦКИА РАН Е.В. Поляковой; к.г.-м.н. зав. лабораторией З.Б. Чистовой; к.г.н. зав. лабораторией ФИЦКИА РАН М.Ю. Гофарову.

ГЛАВА 1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Север Русской плиты по своему географическому положению является уникальной окраинно-материковой геоструктурой. Современные границы ее находятся у бортов зоны, переходной от континента к океану в полосе шельфа Белого, Баренцева и Северного морей (Билибина, 1986). Окраинно-материковое положение определяет регион как область максимальных напряжений геодинамических движений литосферы. Длительная история развития блоковых структур, воздействие разнородных геодинамических напряжений в области материкового склона Баренцева и Белого морей (образование Северного Ледовитого океана), в контакте с Балтийским щитом (область с устойчивой тенденцией к поднятию, начиная с позднего архея), смена геодинамических обстановок в районе Урала, сформировали сложное разломно-блоковое строение региона (Кутинов, Чистова, 2004).

В данном исследовании регион диссертантом рассматривался в пределах административных границ Архангельской области (без Ненецкого автономного округа). Это сделано для удобства представления картографического материала и проведения расчетов.

Архангельская область расположена на северо-западе РФ между $60^{\circ}38'$ с.ш. и $35^{\circ}19'$ и $69^{\circ}11'$ в.д. Мыс Флигели на о. Рудольфа Земли Франца-Иосифа является самой северной точкой страны, мыс Флиссингский крайней восточной точкой Европы. Площадь области составляет 589913 км^2 (3.4% территории РФ). В ее состав входит Ненецкий автономный округ (НАО) площадью 176.7 тыс. км^2 (30.1 % территории области), являющийся самостоятельным субъектом Российской Федерации (Экономика..., 2006). Область граничит на западе с Республикой Карелия, на севере с Мурманской областью (граница проходит через Белое море), на юге с Вологодской и Кировской областями, на востоке с Республикой Коми, на юге и юго-востоке (Ненецкий автономный округ) с Республикой Коми, на востоке с Тюменской

областью (Ямало-Ненецкий автономный округ) и Красноярским краем (граница проходит через Карское море) (рис. 1.1).

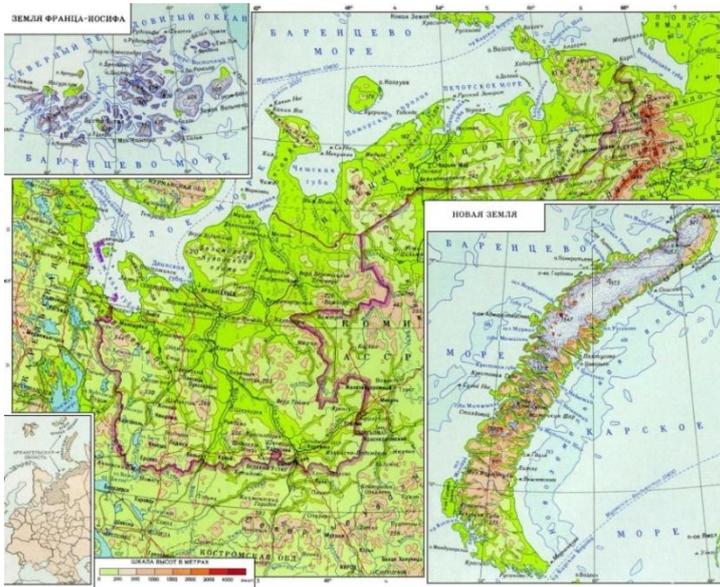


Рисунок 1.1. Карта Архангельской области (Атлас..., 1976)

Область расположена на севере Восточно-Европейской равнины. Омывается водами морей Северного Ледовитого океана (СЛО): на западе Белым морем, на севере – Баренцевым, на северо-востоке – Карским морем. Архангельская область располагается близко к арктическим морям и удалена от тёплого Северо-Атлантического течения (ответвление Гольфстрима).

На акватории морей расположены многочисленные острова, входящие в состав Архангельской области (свыше 10 % территории области). Наиболее крупные из них – Колгуев, Вайгач, Моржовец, архипелаги Новая Земля, Земля Франца-Иосифа, Соловецкий.

Учитывая большую площадь исследуемого региона наиболее оптимально использование цифровых моделей, как минимум, уровня DTED-1 или DTED-2 (табл. 1.1), т.к. ЦМР уровня НРТИ-3 и НРТИ-4 неизбежно приводит к возникновению «избыточной» информации (DTED-2 около 15 млн. точек, 3-й уровень ЦМР – более 1 млрд. точек), затрудняя выделение региональных структур.

В то же время, моноклиналиное залегание пород осадочного чехла (рис. 1.2) с малыми углами падения (рис. 1.3) накладывает определенные требования к точности и разрешению моделей.

Таблица 1.1. Стандартные уровни ЦММ (Никольский, 2008)

Уровень	Пространственное разрешение, м	Вертикальная точность		Источник
		Абсолютная*, м	Относительная**, м	
DTED-1	90x90	30	20	SRTM-C, распространяемая свободно
DTED-2	30x30	18	12	ASTER, SRTM-X, ERS Tandem, SPOT 5 HRS, SRTM-C (ограниченные территории)
HRTI-3		10	2-4***	TanDEM-X, оптические спутниковые системы высокого разрешения
HRTI-4	6x6	5	0,8-2***	Системы самолетного базирования, TanDEM-X

Примечания:

DTED (Digital Terrain Elevation Data) – ЦММ либо ЦМР среднего пространственного разрешения;
HRTI (High Resolution Terrain Information) – ЦММ либо ЦМР высокого пространственного разрешения;

* – определяется как 90% линейная ошибка в глобальном масштабе;

** – определяется как 90% линейная ошибка по точкам для участка 1x1;

*** – в зависимости от рельефа местности.

В осадочном чехле, залегающем с угловым и стратиграфическим несогласием на породах фундамента, выделяются верхнепротерозойские, палеозойские, мезозойские и кайнозойские образования, разделенные длительными стратиграфическими перерывами (рис. 1.3). Эти отложения слагают два тектоно-вещественных мегакомплекса: доплитный или рифтогенные (отложения рифея) и плитный (венд-фанерозойские отложения) (Капустин, Кирюхин, 1987; Станковский, Якобсон, 1986). Они отчетливо различаются как по литологии, так и по своему структурному положению – нижний заполняет прогибы фундамента северо-западного простирания, а верхний – с размывом перекрывает как породы нижнего, так и кристаллический фундамент. Плитный мегакомплекс отличается

своеобразными «окнами» подтока газов и глубинных вод. Это обстоятельство не может не найти своего отражения в современном рельефе. Анализ топоматериалов показал, что подавляющее большинство известных в регионе исследования палеодолин пространственно совпадает с линейными протяженными участками болот. Это позволяет сделать предположение, что при правильной гидрологической коррекции ЦМР они будут выделяться на картах направления потоков и расположения бессточных впадин. Но их выделение требует наличия однородного исходного материала (базовой ЦМР) и программного обеспечения (ПО), позволяющего корректно проводить вышеперечисленные расчеты.

Современный рельеф региона исследований в значительной мере является результатом материковых оледенений, послеледниковой эрозии и тектонических процессов, и представляет собой сочетание форм доледникового денудационно-тектонического, ледникового и послеледникового аккумулятивного и эрозионного генезиса. В формировании рельефа огромную роль играют четвертичные отложения мощных оледенений (рис. 1.5).

В целом формирование дневной поверхности региона происходило, главным образом, под влиянием трех последних оледенений (днепровского, московского, валдайского). В последующем этот фон трансформировался совокупностью процессов разрушения горных пород (денудации), а также эрозией и аккумуляцией, связанных с таянием ледников и переработкой тальми водами рыхлых отложений.

Последнее валдайское оледенение (10-12 тыс. лет назад) дополнило древний рельеф многочисленными моренными холмами, грядами и возвышенностями с обширными низинами, местами заболоченными. На юге Архангельской области к ним относится Няндомская возвышенность и отдельные холмистые участки местности на водоразделах Северной Двины и Пинеги, Пинеги и Вашки, Вашки и Мезени. Отложения последнего оледенения захватывают, по-видимому, южные и восточные части области.

Водноледниковые равнины древних рек, стекающих с моренных возвышенностей, имеют волнистый характер. Самым спокойным рельефом с обилием озер и болот отличаются озерно-ледниковые равнины на большом протяжении рек Северная Двина, Кулой, Мезень, Пеза и другие.

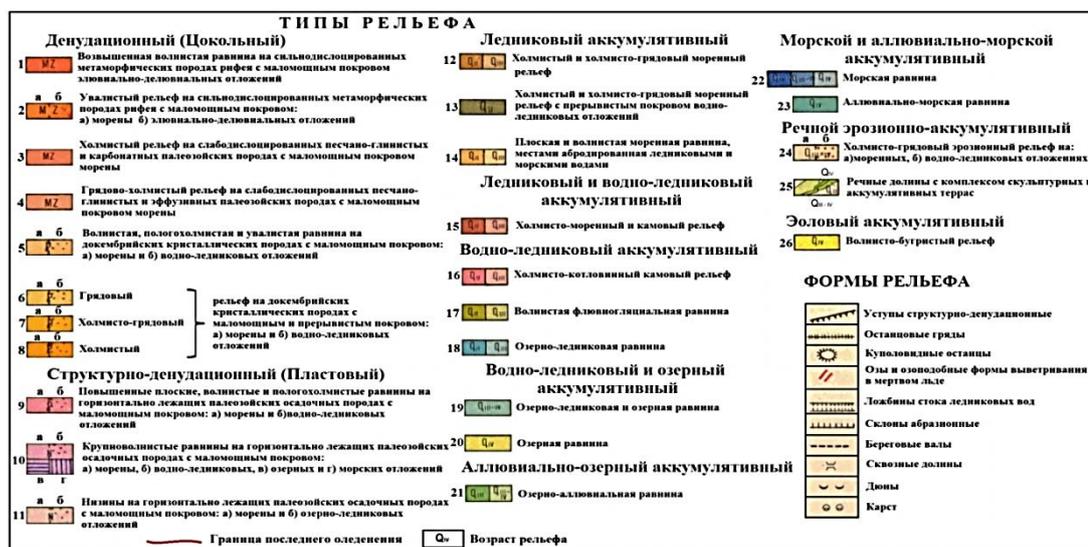
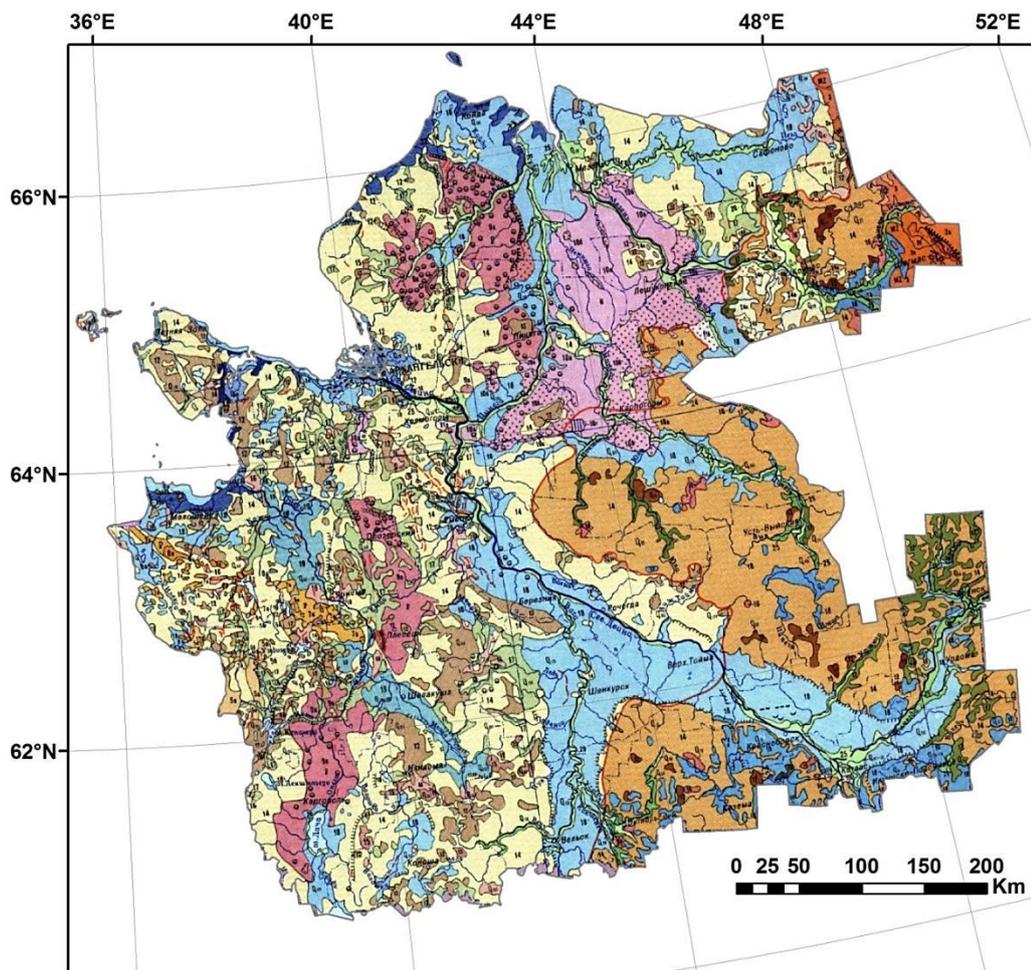


Рисунок 1.5. Геоморфологическая карта Архангельской области (Атлас., 1976)

Морфоструктурными элементами региона являются крупные формы рельефа – возвышенности и низменности (рис. 1.6).

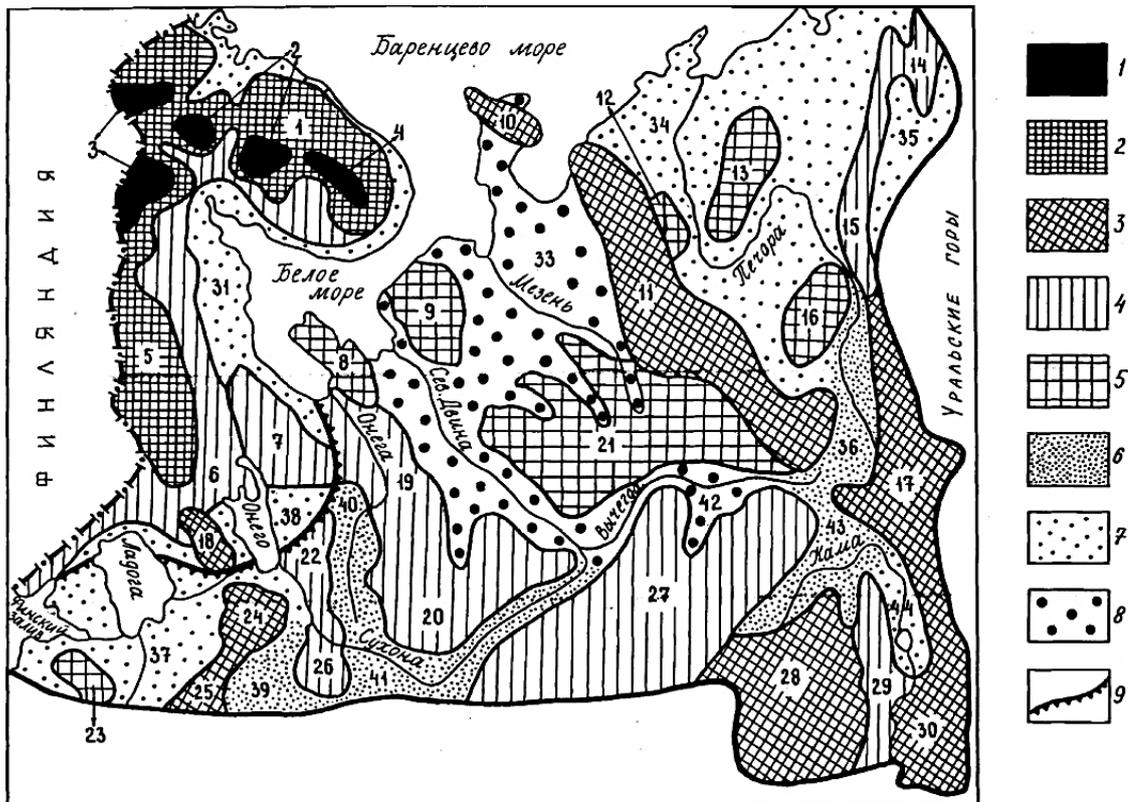


Рисунок 1.6. Орографическая схема Европейской части России (Громцев, 2008):

1-5 – средняя высота возвышенностей (м над уровнем моря): 1) ≥ 300 ; 2) $\geq 220-300$; 3) $\geq 180-200$; 4) $\geq 140-180$; 5) ≤ 140 ; 6-8 – средняя высота низменностей (м): 6) ≤ 100 ; 7) $\geq 60-100$; 8) ≤ 60 ; 9 – граница между Фенноскандией и Русской равниной.

Возвышенности: 1 – Центрально-Кольская; 2 – Хибины; 3 – отроги хребта Маанселькя; 4 – гряда Кейва; 5 – Западно-Карельская; 6 – Средне-Карельская денудационная равнина; 7 – Кряж Ветренный Пояс; 8 – Онего-Двинская; 9 – Беломорско-Кулойское плато; 10 – Канин камень; 11 – Тиманский кряж; 12 – Тобышская; 13 – Большеземельская гряда; 14 – Воркутинская гряда; 15 – Кряж Чернышева; 16 – Ковжинская гряда; 17 – возвышенность Высокая Парма; 18 – Олонецкая; 19 – Обозерско-Лепшинская; 20 – Сухонско-Двинская; 21 – Двинско-Мезенская; 22 – Андомская; 23 – Силурийское плато; 24 – Вепсовская; 25 – Валдайская; 26 – Андогская гряда; 27 – Северные увалы; 28 – Верхне-Камская; 29 – Велвинская; 30 – Бельско-Камская.

Низменности: 31 – Прибеломорская; 32 – Северо-Двинская; 33 – Мезенская; 34 – Нижне-Печорская; 35 – Усинская; 36 – Верхне-Печорская; 37 – Ильменско-Ладожская; 38 – Водлинская; 39 – Молого-Шекснинская; 40 – Воже-Лачинская; 41 – Сухонская; 42 – Сысоло-Вычегодская; 43 – Камско-Кельтминская; 44 – Нижне-Вишерская

В настоящее время территория представляет собой пологую, слегка волнистую равнину, постепенно понижающуюся к Северному Ледовитому океану и разделенную равнинами таких крупных рек как Северная Двина, Пинега, Мезень, Онега. Абсолютные отметки редко превышают 200 м (Сергиенко, 2012).

Прибрежное положение региона обогатило рельеф такими своеобразными формами, как морские террасы и береговые уступы. Некоторые из них имеют вид крутых обрывов высотой до 50 м (например, Зимние горы). Берега Мезенского залива подвергаются интенсивной термоденудации и термоабразии. Скорость отступления берегов в районе о. Моржовец и мысов Конушин и Воронов максимальная как следствие приливно-отливных морских течений (Арэ и др., 2004). Нередок вдоль побережья дюнно-холмистый ландшафт с песчаными валами – дюнами.

Как указывалось ранее, при выборе модели необходимо учитывать и избыточность информации при решении поставленных задач.

В работах посвященных цифровому моделированию рельефа данной территории (Сергеев, 2015, 2016), был выполнен морфостатистический анализ пространственного положения локальных превышений положительных форм, где были приняты следующие количественные характеристики малых и крупных форм: 1) малые формы (морфоскульптуры) рельефа имеют локальные превышения до 12 м и площадь основания менее 1,5 км² и в большинстве случаев, это типичные формы гляциального и нивального рельефов; 2) более крупные формы могут относиться к морфоструктуре – это, также и все виды тектонических положительных форм; 3) узкие, очень вытянутые в плане положительные формы рельефа не фиксировались при данном анализе, т.к. их доля невелика в общей массе форм рельефа.

Так как исследуемая территория принадлежит к спокойным в геодинамическом аспекте равнинно-платформенным областям земной поверхности, где амплитуды относительных превышений рельефа невелики, то необходимо уменьшить искажающее влияние малых форм рельефа для корректного геоэкологического районирования.

Тем же автором (Сергеев, 2016) применен метод спектрального анализа сети гипсометрических профилей, который показал, что только 30 % территории принадлежит положительным малым формам рельефа с

превышениями до 12 м и площадью основания менее 1,5 км². Большая часть изучаемой поверхности занята выпуклыми формами рельефа с площадью оснований превышающими 1,5 км².

Для сохранения в цифровой модели информации о морфоструктуре исследуемой территории достаточно использовать цифровую сеть разрешением 1 км. При этом формы площадью соответствующей разрешению грида (высотной сети) и меньше переходят в разряд фоновых флуктуаций структуры поверхности и будут, естественным образом, исключены при построении геоморфологической модели структуры поверхности. Получение подобной ЦМР выполнено методом «скользящего среднего» для исходных значений ячеек размером 3x3 (Сергеев, 2016).

Однако, учитывая широкое распространение глубоко врезанных долин рек, к бортам которых приурочены участки с максимальными углами наклона поверхности (Гофаров и др., 2006) и, как следствие, с максимальным развитием эрозионных процессов, пространственное разрешение исходной ЦМР должно составлять порядка 30 м (1 угловая секунда).

На настоящее время распространено мнение, что сформировавшийся после валдайского оледенения рельеф достаточно молод и тектонические нарушения не успели проявиться в его формах.

Рассмотрим так ли это. Регион пережил несколько этапов тектоно-магматической активизации (по Кутинов, Чистова, 2004).

1. По характеру потенциальных полей в фундаменте региона прослеживаются протяженные линейные аномалии северо-западного простирания, обусловленные наложенными на архейские образования свекофено-карельскими складчатыми зонами, размещение которых определяют глубинные региональные разломы, вмещающие интрузии ультраосновного состава. Для ранней стадии развития этих структур (поздний архей) характерен преобладающий режим растяжения, сформировавший раздвиги и сбросы северо-западного простирания.

2. В конце позднего архея, в связи со складчатостью, раздвиги и сбросы преобразовались в взбросо-сдвиги и надвиги. Позднеархейские геологические события привели к кратонизации структур Балтийского щита и к формированию преимущественно гранулит-гнейсовых комплексов в Кольском мегаблоке и гранит-зеленокаменных в Карельском, что и определило основные различия этих блоков по составу и строению (Магматизм и металлогения.,1993).

3. Раннепротерозойский период развития Балтийского щита и севера Русской плиты определил их современный тектонический облик. Большинство позднеархейских дизъюнктивных структур сохранило свою активность и в раннем протерозое. Унаследованность в развитии подчеркивается пространственной приуроченностью линейных рифтогенных структур (Ветренопоясная, Имандра-Варзугская, Печенгская), протоорогенных поясов, прогибов и впадин (Савицкий и др., 1986). Созданный в процессе архейской эволюции единый кратон, после периода денудации, подвергся процессам рифтогенеза. В раннем протерозое, также как и в позднем архее, разломы формировались при чередовании условий растяжения-сжатия. Первые преобладали при заложении разрывных структур, вторые – при их завершении. Наиболее мощно и широко процессы сжатия проявились в карельский (1700-1950 млн. лет) этап разломообразования (Савицкий и др., 1986). Надвиги, сбросы, сдвиги и своеобразные зоны складчато-разрывных дислокаций определяют морфо-кинематический рисунок разломных структур раннего протерозоя. Надвиговый характер имели зоны сочленения Карело-Кольского и Белорусско-Балтийского геоблоков, а также входящих в их состав мегаблоков. С надвигами и сбросами пространственно и генетически связаны сдвиги преимущественно северо-восточного и подчиненно субширотного простирания.

В результате первых 3-х периодов активизации сформировалась разломно-блоковая структура фундамента (рис. 1.7).

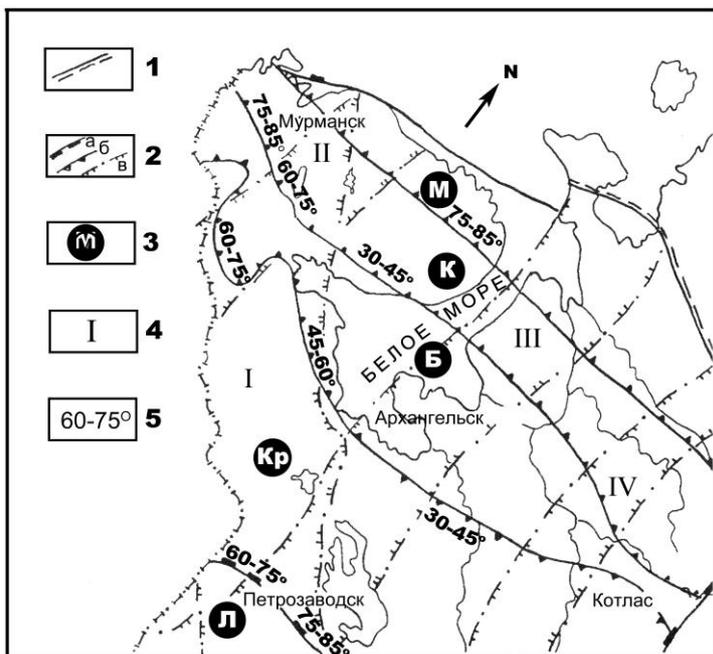


Рисунок 1.7. Схема разломно-блоковой тектоники северо-запада Восточно-Европейской платформы (Кутинов, Чистова, 2001)

1 – западная граница Тиманского поднятия; 2 – разломы, ограничивающие: а) геоблоки; б) мегаблоки; в) трансблоковые зоны; основные мегаблоки и их индексы: М – Мурманский; К – Кольский; Б – Беломорский; Кр – Карельский; Л – Ладожский; 4- трансблоковые зоны: I – Ладожско-Баренцевоморская; II – Хибинская; III – Балтийско-Мезенская; IV – Вельско-Цильменская; 5 – расчетные углы падения поверхностей разломов

4. Период от конца раннего протерозоя (1650 млн. лет) до позднего рифея (900 млн. лет) отвечает новому значительному тектоно-магматическому этапу эволюции восточной части Балтийского щита – развитию рифейского континентального рифтогенеза и формированию авлакогенов на Русской плите (Магматизм и металлогения...,1993).

5. Следующий этап рифтогенеза (1320-900 млн. лет) охватил весь Балтийский щит и Русскую плиту. С позднепротерозойскими этапами образования, протекавшими в условиях растяжения земной коры, связано формирование грабенов и авлакогенов, образовавших своеобразную «палеорифтную систему платформы» (Карта разломов..., 1982). В целом, она унаследованно отражает структурный план раннедокембрийского основания платформы. С формированием системы грабенов и авлакогенов связана активизация северо-западных сбросов и северо-восточных сдвигов. Вдоль северо-западных разломов происходили наиболее интенсивные тектонические процессы с преимущественно вертикальными смещениями блоков, сопровождающиеся активной магматической деятельностью, в силу чего эти разломы можно рассматривать как структурообразующие (Кутинов, 1991б; Кутинов, Чистова, 2001). Неоднократные возобновления блоковых

тектонических движений по разломам фундамента нашли свое отражение в строении осадочного чехла как в региональном плане – в распространении и мощности структурных ярусов и подъярусов и формировании крупных структур, так и более локально (Кутинов, 1991б; Кутинов, Чистова, 2001).

6. Развитие рифейской рифтовой системы завершилось в позднем рифее. Впадины были полностью заполнены серо- и красноцветными толщами, и перекрывающий их венд отлагался на пенепленизированной поверхности (Гриб, 1986). Началу седиментации предшествовал не только длительный перерыв в осадконакоплении, но и тектоническая перестройка, обусловившая заложение платформенного бассейна. С вендом связана коренная перестройка структурного плана всей Русской плиты и, по-видимому, активизация систем разломов фундамента северо-восточной ориентировки – они определяют внешнюю границу бассейна седиментации и создают систему грабенов на юго-восточном склоне Балтийского щита (Гриб, 1986; Станковский, Якобсон, 1986). Наблюдается ступенчатое увеличение мощности отложений в юго-восточном направлении. В процессе формирования вендских пород происходили движения по разломам фундамента, на что указывает сопоставление разрезов венда на горстах и прогибах (Станковский, Якобсон, 1986), а также наличие многочисленных зон трещиноватости (Кутинов, 1991а).

7. На части территории региона в разрезе осадочного чехла нижний палеозой от кембрия до силура включительно полностью отсутствует. Вовлечение этой территории в нисходящее платформенное погружение произошло в девоне. Таким образом, в позднем венде и раннем палеозое произошли две тектонические перестройки, первая, каледонская, привела к восходящим движениям и кратонизации, вторая – герцинская, обусловила переход к нисходящим движениям и погружению бассейна. В дальнейшем режим региона оставался сравнительно стабильным.

8. Палеозойские породы (герцинский ряд) представлены терригенными и карбонатными отложениями карбона и перми, развиты

преимущественно на востоке области и залегают с размывом на породах венда и перекрыты четвертичными отложениями. Тектоническая активизация разломов фундамента прослеживается вплоть до кайнозоя включительно. Палеозойские этапы активизации разломов протекали в условиях чередующихся растяжения и сжатия. Они синхронно проявились в восточной части Балтийского щита, в фундаменте и осадочном чехле Русской плиты.

9. Новая крупная тектоническая перестройка Русской плиты произошла в предтриасовое время. Она выразилась в резком сокращении областей седиментации и образовании в пределах северо-восточной части плиты Вятско-Камской триасовой впадины (Синицын и др., 1986). Подобно вендской активизации, которая сопровождалась трапповым магматизмом (Станковский и др., 1979), в триасе также проявлены траппы. Они были установлены в юго-восточной части Мезенской синеклизы на правом берегу р. Вычегды.

10. Неотектоническая и четвертичная структура Севера Русской плиты обусловлена характером развития Фенно-Скандинавского поднятия, фронт динамического влияния которой достигает Среднего Урала (Макаров, 1996). При этом плита испытывает давление со стороны Фенно-Скандинавского свода, которое способствует возникновению полей напряжений и развитию деформаций (Кутинов и др., 1999, 2014). В результате в пределах плиты отчетливо проявлены чередующиеся зоны поднятий и впадин, концентрически огибающих Фенно-Скандинавский свод, а также серия поперечных к ним (радиальных) линеаментов (вероятно зоны растяжения и повышенной трещиноватости земной коры), а также зоны тектонических ступеней (флексур) (Макаров, 1996).

11. Распространение кайнозойских образований обусловлено: распространением и интенсивностью неотектонических движений; режимом аккумуляции осадков, обусловленных наступлением покровных оледенений и разделяющих их морских трансгрессий.

Таким образом, регион пережил, как минимум, 10 этапов тектоно-магматической активизации. При этом возникает вопрос, нашли ли отражение тектонические структуры в современном рельефе и каков характер этого отражения. Ответы на эти вопросы имеют принципиальное значение для геоэкологического районирования территории.

Статистический анализ азимутального распределения признаков разломов в физических полях и в природной обстановке (Кутинов, Чистова, 2004) показал, что одни и те же направления имеют максимальное представительство на космофотоснимках и в геоморфологических материалах, отражающих современные напряжения в земной коре, и в потенциальных полях, фиксирующих в основном строение докембрийского фундамента региона (рис. 1.8). Этот факт говорит об определенной «консервативности» разрывных дислокаций и о длительной истории их развития, что, несомненно, нашло свое отражение в строении осадочного чехла, и было подчеркнуто экзогенными процессами. Это обеспечило проявление практически всех тектонических систем коренных пород на дневной поверхности.

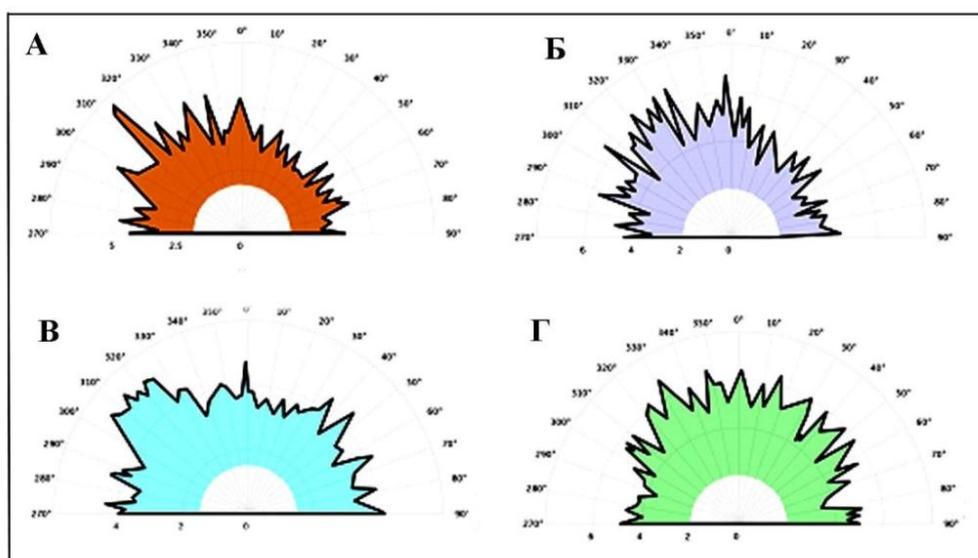
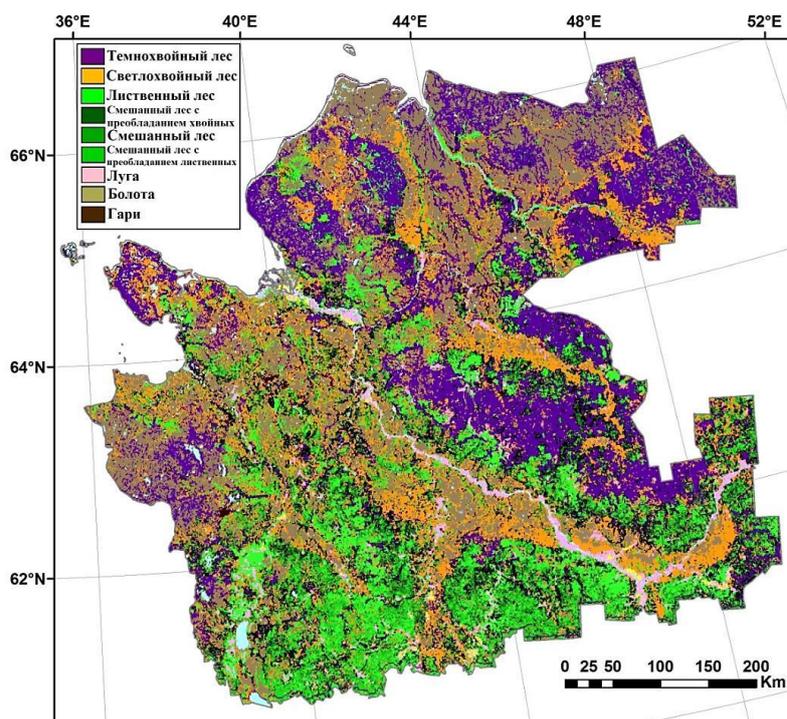


Рисунок 1.8. Розы-диаграммы элементов-индикаторов разломов территории Архангельской области (обработка данных масштаба 1:200000) (Кутинов, Чистова, 2004): А – поля силы тяжести; Б – магнитного поля; В – космофотолинеаментов; Г – гидросети

Еще одним фактором, влияющим на выбор ЦМР, является растительный покров. Это объясняется тем, что территория Архангельской области покрыта практически сплошным растительным покровом (лесистость области составляет 77,7 %), характеризуется крайне низкой заселенностью и отсутствием высотных построек в городах и населенных пунктах. Средняя высота лесного покрова составляет 10-12 м, что соответствует точности исходной модели по высоте (рис. 1.9). Таким



образом, в данном случае можно не вводить в расчеты поправки за растительность и городские строения, не теряя качества полученной модели.

Рисунок 1.9. Леса Архангельской области (с сервиса Вега-Про, ИКИ РАН)

Суммируя вышеизложенное, следует отметить, что основные черты рельефа исследуемого региона, влияющие на выбор ЦМР, программного обеспечения (ПО) и применяемых методик обработки следующие:

- площадь исследуемого региона (589913 км²), наиболее оптимально использование цифровых моделей, как минимум, уровня DTED-2;

- небольшие абсолютные значения высот и слабая расчленённость рельефа. Регион характеризуется распространением низменных заболоченных и «плоских» пространств, сменяемых слабохолмистыми равнинами на абсолютных высотах 30-90 м и переходящих в водораздельные плато на высотах 120-200 (и более) м, обуславливают требования к точности модели и ее «однородности»;

- моноклиналиное залегание пород осадочного чехла с малыми углами падения;

- несколько этапов тектоно-магматической активизации, подчеркнутых составом и физико-механическими свойствами пород осадочного чехла и простиранием тектонических нарушений (Кутинов, Чистова, 2004). Структуры, сформированные во время тектоно-магматических активизаций, пространственно совпадают;

- несмотря на слабую расчлененность и «молодость» рельефа, обусловленных широким распространением валдайского оледенения, большой мощностью перекрывающих четвертичных отложений (40-200 м), тектонические структуры и нарушения отражаются в современном рельефе (Кутинов, Чистова, 2004; Полякова и др., 2019);

- только 30% территории принадлежит формам рельефа площадью основания менее 1,5 км². Большая часть изучаемой поверхности занята выпуклыми формами рельефа с площадью оснований, превышающими 1,5 км² (Сергеев, 2016). Для сохранения в цифровой модели информации о морфоструктуре исследуемой территории необходимо и достаточно использовать цифровую сеть разрешением 1 км. Однако гипсометрические профили через долины некоторых рек области показывают, что врезы этих рек имеют глубокие V-образные формы, поэтому для анализа долин рек и происходящих эрозионных процессов, разрешения модели в 1 км недостаточно. В этих случаях необходимо использование цифровых моделей, как минимум, уровня DTED-2 (30 м);

- широкое распространение лесного покрова (77,7 %, территории), который вносит погрешность в значения высотных отметок за счет высоты древостоя. Для среднемасштабных ЦМР это влияние значительно меньше и его можно избежать, используя относительные значения высот рельефа ЦМР. К тому же средняя высота древостоя сопоставима с точностью среднемасштабных ЦМР.

ГЛАВА 2 СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ, СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ СТРОЕНИЮ И ГЕОМОРФОЛОГИИ РЕГИОНА

Для создания цифровой модели рельефа, которая будет соответствовать геологическому строению и геоморфологии региона, и являться количественной основой для геоэкологического районирования, необходим корректный выбор базовой модели и ее подготовка.

В настоящее время при изучении состояния природной среды в мировой практике широко применяются материалы различных космических съемок с искусственных спутников Земли (ИСЗ). Для геологической среды – это, в первую очередь, изучение экзогенных геологических процессов. При выделении геоэкологических объектов, единых правил извлечения информации из космических снимков до сих пор не существует. Наиболее распространены приемы непосредственного распознавания конкретных объектов, структур или следов прошедших процессов, а также формального выделения различных элементов ландшафта с последующей, качественной и количественной интерпретацией результатов. Большинство показателей, необходимых для количественной оценки морфологии рельефа и специфики эрозионных процессов, можно получить с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) и/или цифровых моделей местности (ЦММ). Использование ЦМР позволяет оценить скорости протекания эрозионных процессов на исследуемой территории и выделить площади аккумуляции осадков, в т. ч. и загрязняющих веществ, и площади развития деструктивных процессов.

Использование современных данных ЦМР и ГИС-технологий позволяет провести геоэкологическое районирование территории на качественной цифровой основе, выделять участки развития экзогенных процессов и оценить устойчивость рельефа.

На настоящий момент основным и современным способом представления формы земной поверхности является ЦМР или ЦММ, рынок

которых стремительно развивается. Цифровой моделью рельефа (ЦМР) называют представление поверхности рельефа в цифровом виде, созданное по данным высот рельефа.

Существует некоторая неопределенность в интерпретации зарубежной терминологии (<http://sovzond.ru>):

- DEM (Digital Elevation Model) – высота рельефа (ЦМР – цифровая модель рельефа) (рис. 2.1);

- DSM (Digital Surface Model) - высота видимой поверхности (ЦММ – цифровая модель местности) (рис. 2.1);

- DTM (Digital Terrain Model) – точного определения не существует, в некоторых случаях рассматривается аналогично ЦМР (DEM), в некоторых случаях включает дополнительную информацию.

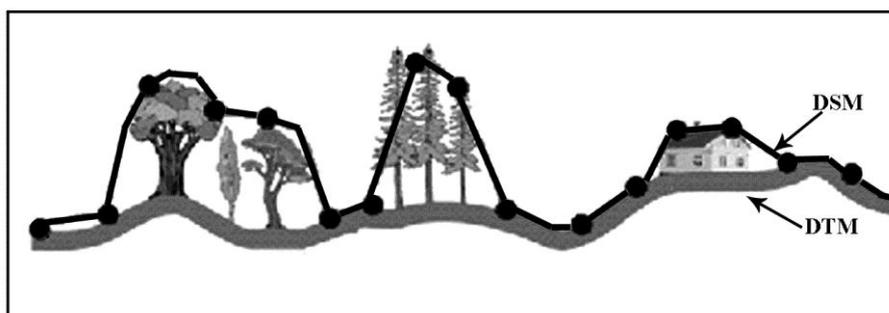
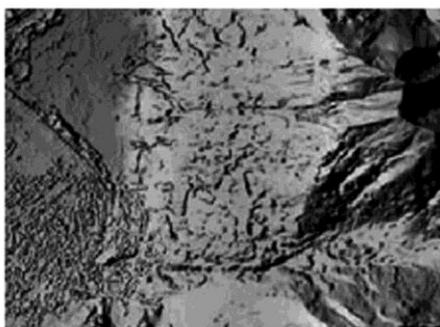


Рисунок 2.1.
Основные виды
высотной информации
(<http://sovzond.ru>)

Данные о рельефе в виде ЦММ и ЦМР являются исходным материалом, для национальных картографических проектов и могут быть использованы для решения самых разнообразных задач. ЦММ (рис. 2.2, А) представляют собой точные данные о высоте земной поверхности, включая здания, растительность и другие высотные объекты (Расширение возможностей..., 2012).

А



Б

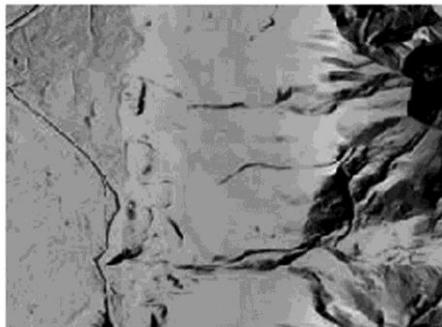


Рисунок 2.2.
Цифровые модели:
А – местности; Б –
рельефа

ЦМР (рис. 2.1, 2.2, Б) содержат информацию о высоте непосредственно дневной поверхности земли, исключая все здания, растительность и т.д.

Следует отметить, что для территорий с широким развитием растительного покрова, не существует в «чистом» ЦМР или ЦММ. Обычно это некий промежуточный вариант (DTM по западной терминологии).

ЦМР может быть представлена как в растровом формате (рис. 2.3, А), так и в векторном – в виде нерегулярной триангуляционной сети (TIN, triangular irregular network) (рис. 2.3, Б). Растровый формат – это сетка ячеек, значения которых содержат высоты рельефа. Нерегулярная триангуляционная сеть – это набор узлов с пространственными координатами (x, y, z) и треугольников со сторонами, соединяющими данные узлы. Координата z узла определяет высоту.

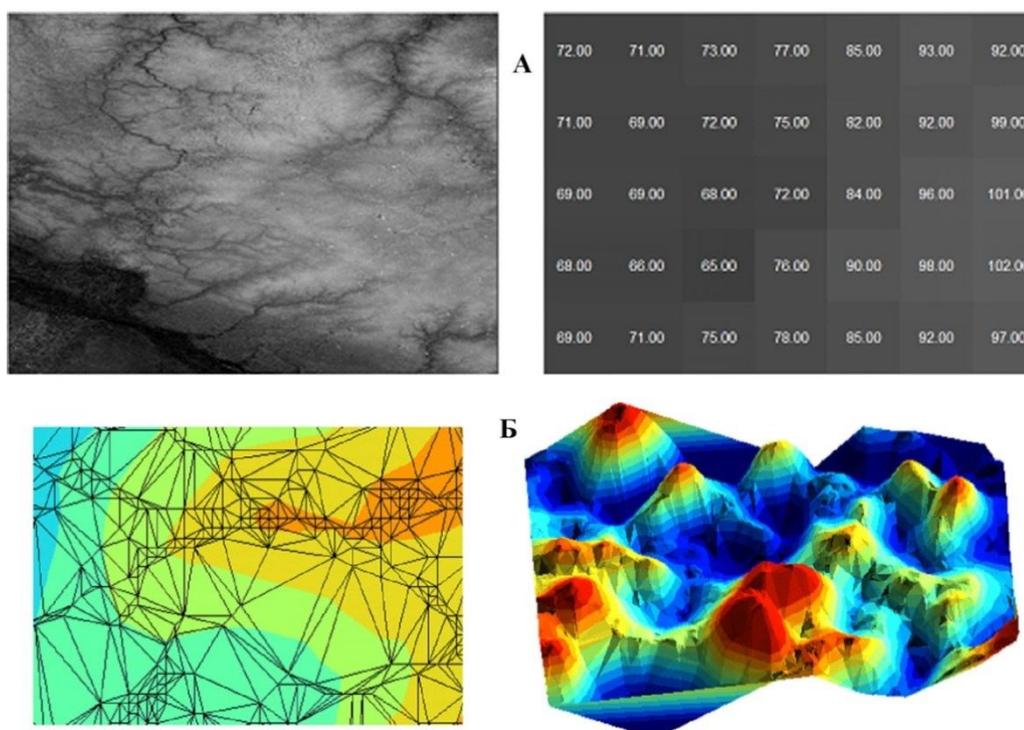


Рисунок 2.3. Фрагмент ЦМР Архангельской области

А – в растровом формате (ячейки сети содержат значения высот); Б – в виде нерегулярной триангуляционной сети (TIN)

Источниками исходных данных для создания ЦМР служат топографические карты, аэрофотоснимки, космические снимки, данные альтиметрической и радиолокационной съемки, данные спутниковых систем

позиционирования, нивелирования и др. Соответственно, существует несколько методов получения ЦМР (Баранов, 2001): спутниковая и авиационная стереосъемка (как оптическая, так и радиолокационная); воздушное лазерное сканирование, характеризующееся, с одной стороны, максимально высокой точностью, а с другой – достаточно высокой стоимостью; получение ЦМР по одиночным космическим изображениям или аэрофотоснимкам; оцифровка существующих топографических карт с последующим получением ЦМР в соответствующем программном обеспечении.

В целом цифровые модели можно дифференцировать по: технологии создания; пространственному разрешению и точности; степени охвата территории (глобальные, региональные локальные); по степени «доступности» на свободно распространяемые и платные.

Точность ЦМР оценивается, в первую очередь, плотностью выборки или размером шага выборки (рис. 2.4). В растровом формате эта величина выражена разрешением сетки (размером ячейки). Геометрическая точность ЦМР зависит от того, по каким исходным снимкам и элементам ориентирования они были получены. Точность глобальных ЦМР традиционно оценивается по более точным моделям высот, имеющихся для отдельных участков, и выражается с помощью различных усредненных показателей, таких, например, как СКО (среднеквадратическая ошибка, вычисленная по расхождениям значений высот между исследуемой глобальной и эталонной моделями) или LE90 (пороговое значение для 90% расхождений).

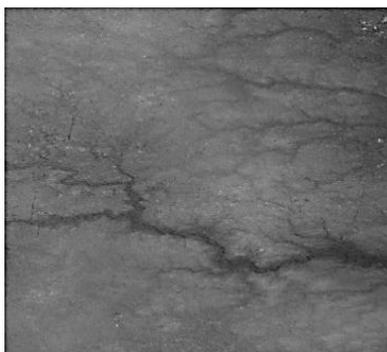
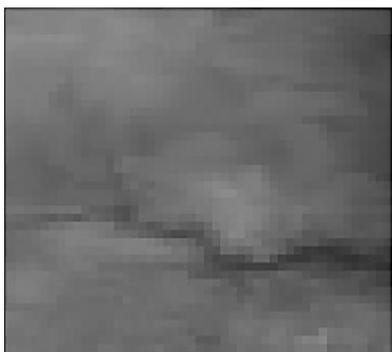
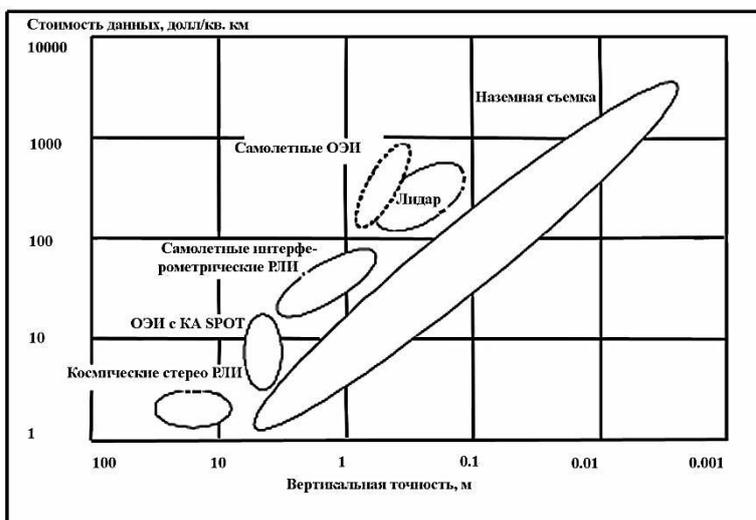


Рисунок 2.4.
Фрагмент ЦМР
Архангельской области: а)
шаг выборки 900 м; б) шаг
выборки 30 м

Другой фактор – это разрешение по высоте. Такими факторами выражается абсолютная точность ЦМР. Качество ЦМР определяет, насколько соответствует представленная в ЦМР морфология рельефа действительной.

Другие влияющие на точность факторы – это тип данных (целочисленные или с плавающей точкой) и фактической выборка поверхности при создании оригинальной ЦМР. Цифровые модели рельефа (как специфические геопространственные данные) по существующей классификации Международного комитета по дистанционному зондированию CEOS относятся к 4 уровню обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). Уровень требований к точности описания рельефа определяется типом научной или инженерно-технологической задачи и методами ее решения. Постоянное совершенствование радиометрических и геометрических характеристик приборов сканерного и кадрового типа, устанавливаемых на средствах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), ставит потребителей перед выбором между наземной съемкой рельефа (дорогостоящей и потому локальной, но геоморфологически упорядоченной) и регулярными растровыми (цифровыми) моделями на значительные районы вплоть до глобального покрытия поверхности Земли. ЦМР отличаются и в



стоимостном выражении, причем весьма значительно (рис. 2.5).

Рисунок 2.5. Оценка стоимости ЦМР в зависимости от источника данных и разрешения (по данным Полетаева А.М.)

2.1 Технологии создания ЦМР

Рассмотрим кратко технологии создания ЦМР.

Оцифровка существующих топографических карт с последующим получением ЦМР в соответствующем программном обеспечении.

Зачастую требования по точности ЦМР можно удовлетворить, создавая модели на основе цифровых топографических карт соответствующего масштаба. Цифровые модели рельефа обычно строятся по векторным картам горизонталей, отметок высот и урезов воды согласно имеющимся методическим рекомендациям (Методическое руководство..., 1972; Руководство..., 1986), с использованием различных методов интерполяции и ГИС-пакетов.

Процесс создания модели рельефа (в триангуляционном или матричном виде) по цифровым данным такого типа в настоящее время хорошо изучен, реализован во многих ГИС-пакетах (Гофаров и др., 2006).

Среднемасштабные цифровые модели рельефа для равнинных территорий, к которым относится и исследуемый район, по нерегулярной сети высотных отметок характеризуются значительным количеством артефактов, особенно в областях распространения сильно врезанных долин.

Корректное построение модели рельефа по цифровым топографическим картам невозможно без проведения предварительной обработки, исключающей негативное влияние особенностей представления данных на картах (<http://www.gisinfo.ru/item/22.htm>).

Лазерное сканирование (или лидарная съемка) подразделяется на воздушное, наземное и мобильное.

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) применяется для высокоточного картографирования линейных и площадных объектов в масштабах 1:500-1:5000 с воздушных носителей (самолет, вертолет, автожир). Точность (<http://sovzond.ru>) – 5-8 см, детальность отрисовки – 20-50 см, производительность – до 800 погонных км съемок в день (ширина полосы съемки до 1000-1500 м). Обычно сопровождается одновременной

цифровой аэрофотосъемкой с разрешением 5-15 см в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. В основном применяется при инженерных изысканиях на инфраструктурных объектах, в городском хозяйстве, для оценки объемов перемещенного грунта (карьеры, полки, полигоны ТБО), мониторинга объектов любого характера. Съемка ведется в непрерывном режиме, особенно эффективна для малообжитых территорий.

Недостатки: чрезвычайно высокая стоимость работ и низкая производительность. Тем не менее, воздушное сканирование – гораздо детальнее, точнее и быстрее классической аэрофотосъемки.

Получение ЦМР по космическим изображениям или аэрофотоснимкам. Космическая съемка позволяет решить задачу создания подробных и достаточно точных цифровых моделей местности с применением высокотехнологичных методов обработки данных ДЗЗ. Для создания такой продукции необходимы изображения, образующие стереопару (рис. 2.6), либо интерферометрическую пару (для радарных данных) (рис. 2.7), позволяющие получить информацию о рельефе местности, а также специализированное программное обеспечение для последующей обработки полученной информации.

С появлением спутников ДЗЗ гражданского и двойного назначения, оборудованных оптико-электронными сенсорами сверхвысокого разрешения, космические снимки смогли составить конкуренцию аэрофотоснимкам для получения высокоточной информации о рельефе местности. Съёмочная аппаратура, установленная на борту современных космических аппаратов ДЗЗ (например, WorldView-1,2, GeoEye-1 и т.д.), позволяет получать высотную информацию о рельефе и объектах поверхности с точностью до нескольких метров (<http://sovzond.ru>). При этом стереосъемка выполняется либо с одного витка (рис. 2.6а), путем отклонения оси визирования, или используя дополнительные объективы, установленные под углом относительно надира (<http://sovzond.ru>). Или же стереосъемка выполняется с соседних витков (рис. 2.6б).

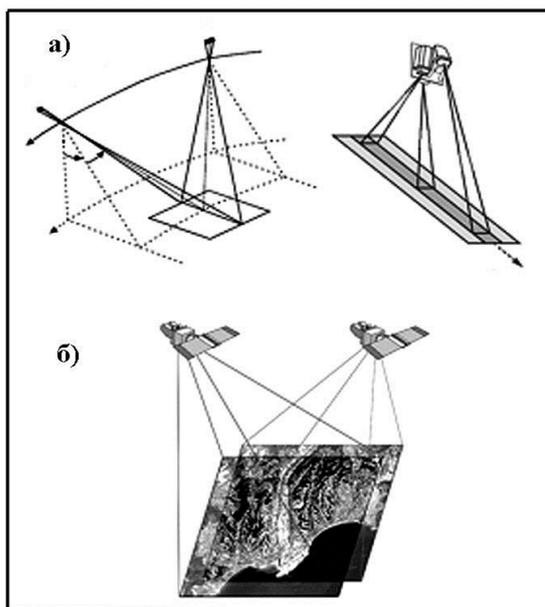


Рисунок 2.6. Изображения, образующие стереопару (<http://sovzond.ru>)
а) с одного витка; б) с соседних витков

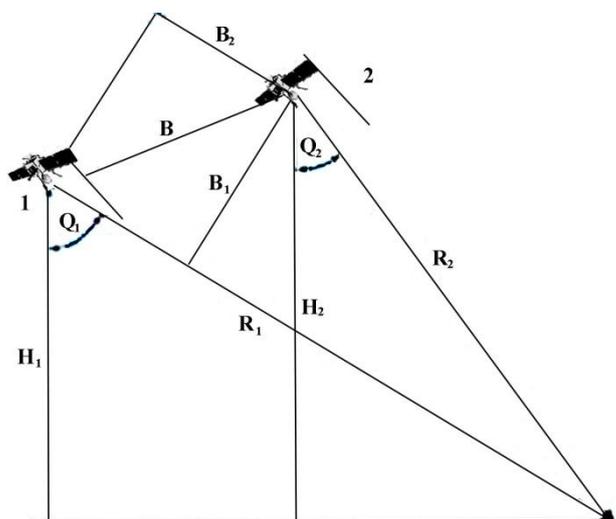


Рисунок 2.7. Пространственное положение радиолокаторов, изображения с которых образуют интерферометрическую пару (Баранов и др., 2008)

H_1 и H_2 – высота радиолокатора;
 R_1 и R_2 – дальность (путь зондирующей волны); Q_1 и Q_2 – угол между дальностью и высотой; B_1 и B_2 – перпендикулярная и параллельная составляющие базовой линии B

Изготовление цифровой модели рельефа (ЦМР – DTM) основывается на «классических» стереофотограмметрических методах создания картографической продукции, используемых цифровые методы стереовизуализации пар космических снимков (<http://sovzond.ru>). Сбор высотной информации производится в ручном либо полуавтоматическом режимах. Полученная таким образом высотная информация включает в себя не только высоты точек рельефа местности с заданным шагом, но и основные структурные элементы (элементы гидрографии и основные орографические линии). Выходная продукция представляет собой регулярную сетку высот с

шагом на местности, который также определяется разрешением исходных космических снимков, включающую в себя высоты точек рельефа местности, сформированную с учетом орографических линий.

Точность цифровых моделей, получаемых на основе космических стереоснимков, зависит от геометрической точности и разрешающей способности исходных данных, а также от условий съемки. Для всех видов данных точность обработки может быть улучшена благодаря использованию наземных опорных точек, с известными координатами. Контрольные точки также позволяют перейти к абсолютным значениям высот поверхности.

Исходя из пространственного разрешения съемочной аппаратуры, созданные на базе стереопар цифровые модели можно условно разделить на 3 типа: высокодетальные (шаг на местности 1-5 м), детальные (шаг на местности 5-10 м) и среднедетальные (шаг на местности 10-20 м).

Метод радарной интерферометрии по данным радиолокаторов космического базирования в настоящее время является одним из наиболее эффективных методов построения цифровых моделей рельефа на больших площадях (Баранов, 2008). Но в силу своей физической природы радарные методы, основанные на отражении радиоволн, позволяют получать информацию о высотах условной отражающей поверхности, которая в общем случае не совпадает с топографической поверхностью Земли.

Расхождения между высотами этих поверхностей наиболее существенны на залесенной и застроенной территории и зависят от многих факторов, таких, как высота и густота лесного покрова, высота и плотность застройки, параметров радиолокационного сигнала (длина волны сигнала, разрешающая способность, поляризация), методов и алгоритмов обработки данных и т.п. (Оньков и др., 2012).

В свою очередь, точность определения высоты поверхности, построенной по радарным данным, также зависит от вида отражающей поверхности, параметров съемки, методов обработки и т.п.

2.2 Глобальные цифровые модели рельефа

Глобальные цифровые модели рельефа – это ЦМР, охватывающие всю или почти всю территорию Земли. Кроме факторов, оказывающих влияние на точность и качество таких ЦМР, они характеризуются рядом других параметров: охват поверхности земного шара; формат и тип данных; специальное значение для областей, в которых значение высоты отсутствует; система координат; размер фрагмента, если ЦМР разбита на фрагменты; доступность и условия использования.

Для растровых ЦМР наиболее распространен формат GeoTIFF. Формат GeoTIFF – это дополненный данными о привязке к географическим координатам формат TIFF. Дополнительные данные содержат информацию о картографической проекции, системе координат, даты и всю остальную информацию, необходимую для пространственной привязки.

Тип данных значений может быть целочисленным или вещественным, со знаком или без знака, а также может быть различного размера – 8 бит, 16 бит, 32 бита и так далее. Объем дискового пространства, занимаемый ЦМР, зависит от типа данных представленных в ней значений. Также тип данных определяет точность значений и диапазон, в котором они могут быть выражены.

Для конкретной глобальной ЦМР необходимо знать величину специального значения, маркирующего отсутствие данных. Это значение является входным параметром многих инструментов геоинформационных систем. Иногда явные артефакты, неисправленные ошибки в ЦМР также заполняются этим значением. Обычно это либо очень большая, либо очень малая величина. Например, -9999, 65536, 32768 (рис. 2.8).

Артефактами или ошибками ЦМР называют аномальные значения высот, несоответствующие действительным. Такие артефакты снижают (и значительно) качество ЦМР и рассчитанных параметров рельефа. Обычно они возникают на территориях с постоянной облачностью, на стыке снимков.

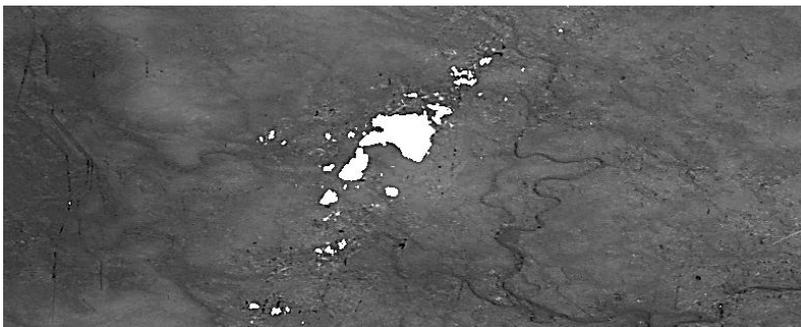


Рисунок 2.8.
Отсутствующие данные в
глобальной ЦМР ASTER
GDEM на территории
Архангельской области

Область, окруженная большими значениями высоты, называется приемником, впадиной, локальным понижением. Область, окруженная меньшими значениями высоты, называется пиком. Наиболее вредны для анализа рельефа на основе ЦМР впадины, они затрудняют гидрологический анализ, нарушая естественный поток воды. Перед проведением анализа поверхности и расчета геоморфометрических параметров от таких

артефактов необходимо избавляться (рис. 2.9).

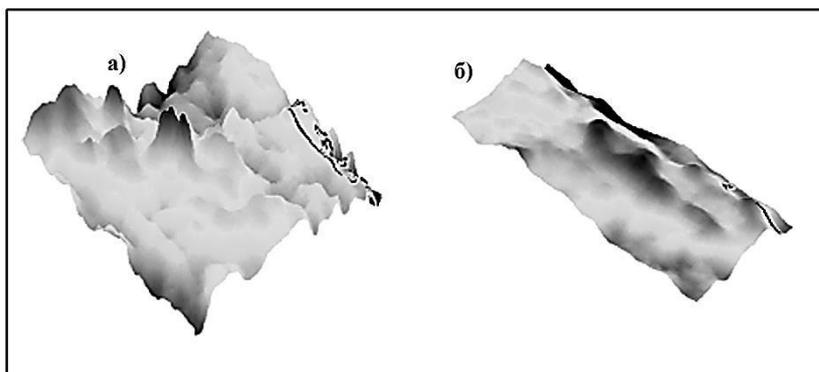


Рисунок 2.9.
Фрагмент ЦМР
Архангельской области: а) с
артефактами; б) без
артефактов

Большинство современных геоинформационных систем предоставляют инструменты, позволяющие устранять ошибки подобного рода.

В данном исследовании наиболее подробно были рассмотрены свободно распространенные ЦМР.

ГТОР030 (Global 30 Arc-Second Elevation) – это глобальная ЦМР, разработанная сотрудниками Центра наблюдения за земными ресурсами и науки (Earth Resources Observation and Science (EROS) Center) Геологической службы США (United States Geological Survey, USGS) (рис. 2.10). ЦМР начали разрабатывать в 1993 году. С тех пор в некоторых областях ЦМР были обновлены данные высот, а вся ЦМР была полностью «пересобрана». Первая версия была доступна в 1996 году.

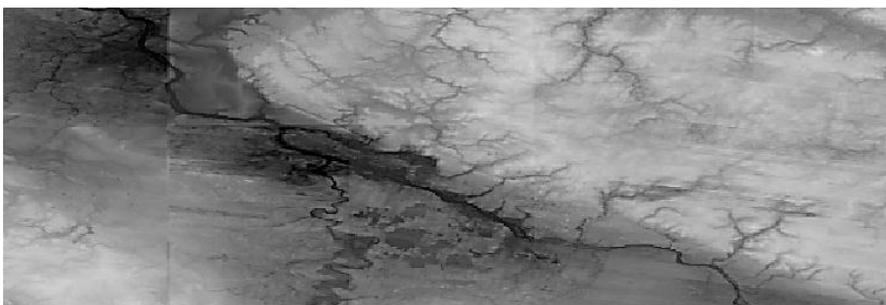


Рисунок 2.10
Фрагмент ЦМР
GTOPO30 на территории
Архангельской области

ЦМР охватывает область земного шара между 90° с.ш. и 90° ю.ш., и между 180° в.д. и 180° з.д. Шаг выборки данных равняется 30 угловым секундам, что соответствует примерно 900 м, результирующая сетка содержит 21600 строк и 43200 столбцов. Координаты выражены в градусах широты и долготы в системе WGS84. Значения высот представлены в диапазоне от -407 до 852 метров. Области, занятые океанами, помечены в ЦМР как не имеющие значения (*no data*) и приравнены к -9999.

Прибрежные области имеют значение высоты не менее 1 м, поэтому при работе с ЦМР возможно переопределить в таких областях значение -9999 значением 0, сохранив при этом очертания берегов. В силу растровой структуры ЦМР, в ней не представлены острова площадью менее 1 км^2 .

В целях упрощения распространения в электронном виде GTOPO30 разделена на 33 области, называемые тайлами. Область между 90° с.ш. и 60° ю.ш. и между 180° в.д. и 180° з.д. представлена 27 тайлами, размер каждого составляет $50^\circ \times 40^\circ$ (рис. 2.11). Антарктида (между 60° с.ш. и 90° ю.ш. и между 180° в.д. и 180° з.д.) представлена 6 тайлами размером $30^\circ \times 60^\circ$. Название каждого тайла составляется из координат долготы и широты его верхнего левого угла.



Рисунок 2.11. Тайл
GTOPO30,
покрывающий
территорию
Архангельской
области

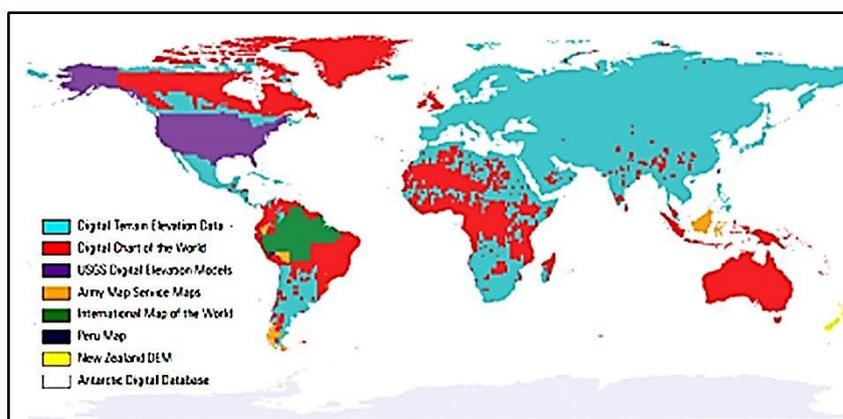
Каждый тайл представляет собой совокупность из 8 файлов. Файлы имеют описанное выше название тайла, различаются расширениями файлов: файл ЦМР (.DEM) – растровый файл со значениями высот, тип данных значений – целое число со знаком и размером 16 бит; заголовочный файл (.HDR) – текстовый файл с информацией о размере и координатах тайла и другой дополнительной информацией, например, о величине значения, обозначающего отсутствие данных; файл World (.DMW) – текстовый файл, содержащий информацию, необходимую для координатной привязки тайла; файл статистики (.STX) – текстовый файл со статистическими данными, такими как минимальное, максимальное, среднее значение высоты и значение стандартного отклонения; файл проекции (.PRJ) – текстовый файл, описывающий проекцию ЦМР; файл с изображением теневой отмывки рельефа (.GIF) – обзорное изображение, представленное в ЦМР рельефа; файл источников (.SRC) – 8-битное растровое изображение, каждая ячейка которого содержит код источника (таблица 2.1, рис. 2.12), из которого было получено значение соответствующей ячейки ЦМР, данный файл содержит такое же разрешение и систему координат, что и ЦМР; заголовочный файл исходной карты (.SCH) – аналогичный по структуре заголовочного файла ЦМР текстовый файл с информацией о размере и координатах маски кодов исходных карт. Специальный код 0 используется для обозначения областей, занятых океаном.

Все 8 файлов каждого тайла упакованы в архив и распространяются одним файлом с расширением tar. В неупакованном виде GTOPO30 занимает около 2.72 гигабайта дискового пространства, из которых 1.74 гигабайта занимают файлы ЦМР (.DEM) и около 890 мегабайт занимают 8-битные маски исходных карт. В упакованном виде GTOPO30 занимает 290 мегабайт.

GTOPO30 доступна для «скачивания» по протоколу передачи файлов (File Transfer Protocol, FTP) с сервера EROS Data Center по адресу <ftp://edcftp.cr.usgs.gov>. Документация GTOPO30 доступна по адресу <ftp://edcftp.cr.usgs.gov/data/gtopo30/global/README.TXT>.

Таблица 2.1 Источники ГТОРО30

Код	Источник	Покрытие, %	Абсолютная точность по высоте, м
1	Digital Terrain Elevation Data	50,00	30
2	Digital Chart of the World	29,90	160
3	USGS 1-degree DEM's	6,70	30
4	Army Map Service Maps	1,10	250
5	International Map of the World	3,70	50
6	Peru Map	0,10	500
7	New Zealand DEM	0,20	15
8	Antarctic Digital Database	8,30	сильно варьируется

Рисунок 2.12.
Источники ГТОРО30

SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission) – совместный проект Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, NASA), Национального агентства геопространственной разведки США (National Geospatial-Intelligence Agency, NGA) и космических агентств Германии и Италии. Проект был запущен в феврале 2000 года. В рамках проекта была проведена топографическая космосъемка большей части земного шара двумя радиолокационными радарными на борту космического шаттла.

Для проекта SRTM из двух радаров С-диапазона и Х-диапазона был собран интерферометрический радар, способный сравнивать два сигнала, взятых под разными углами. Разность этих двух сигналов позволяет вычислить значения высот поверхности.

Миссия длилась 11 дней, в каждый из которых корабль 16 раз облетал вокруг Земли. Целью миссии было получить цифровую модель рельефа,

охватывающую поверхность земного шара между 60° северной и 56° южной широты (приблизительно 80 % поверхности Земли) (рис. 2.13).



Рисунок 2.13.
Охват поверхности
земного шара SRTM

ЦМР была подготовлена из необработанных данных радара С-диапазона лабораторией реактивного движения NASA (Jet Propulsion Laboratory, JPL). Сотрудники NGA очертили и сгладили водные объекты, более точно определили береговые линии, удалили пики и впадины и заполнили данными небольшие пустоты, тем самым завершив работу над данной ЦМР.

Тем не менее, в SRTM остались области отсутствующих данных на тех территориях, в которых при первичной обработке не были соблюдены технические требования. Поскольку SRTM является наиболее часто используемой ЦМР, сотрудниками NGA были заполнены эти пустоты с помощью методов интерполяции и сторонних источников данных о высоте. Результатом такой дополнительной обработки стала ЦМР SRTM Void Filled.

Разрешение сетки, полученных ЦМР SRTM и SRTM Void Filled составило 1 угловую секунду (около 30 м) для территории США и 3 угловые секунды (90 м) для других территорий.

Координаты выражены в градусах широты и долготы в системе WGS84. Значения высоты выражены в метрах. ЦМР поставляется в виде тайлов размером 1°×1°.

Абсолютная точность по высоте составляет ±16 м, относительная ±10 м. Абсолютная точность определения координат ±20 м, относительная ±15 м.

SRTM и SRTM Void Filled поставляются в трех разных форматах:

- DTED (Digital Terrain Elevation Data) – формат, разработанный NGA, каждый файл содержит матрицу значений высот, расположенных через одинаковые интервалы, измеряемые в географических широте и долготе, размер одного файла составляет приблизительно 25 Мб для разрешения 1 угловая секунда и 3 Мб для 3 угловых секунд;

- BIL (Band interleaved by line) – бинарный растровый формат с сопутствующим заголовочным файлом, описывающим пространственное положение и структуру файла ЦМР, размер файла формата BIL составляет приблизительно 7 Мб для разрешения 1 угловая секунда и 1 Мб для 3 угловых секунд;

- GeoTIFF – более удобен для работы в различных геоинформационных системах, размер файла составляет приблизительно 25 Мб для разрешения 1 угловая секунда и 3 Мб для 3 угловых секунд.

GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010).

Как указывалось ранее, точность GTOPO30 варьируется в диапазоне от ± 15 до ± 500 м. К тому же в ней представлены не все особенности рельефа (например, плохо представлены хребты и впадины). Но, несмотря на низкое разрешение и неполноту данных, GTOPO30 широко использовалась в различных гидрологических, климатических, геоморфометрических системах. Когда в 1996 году Геологическая служба США разработала первую версию GTOPO30, не было никаких топографических данных, которые покрывали бы всю поверхность земного шара. Поэтому в ее основу легли 8 источников. Однако с тех пор ситуация с доступностью высококачественных данных о высотах рельефа заметно изменилась. Используя наиболее качественные доступные данные, Геологическая служба США и Нац. агентство геопрограммной разведки разработали на смену GTOPO30 усовершенствованную глобальную ЦМР, названную GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010) (рис. 2.14).

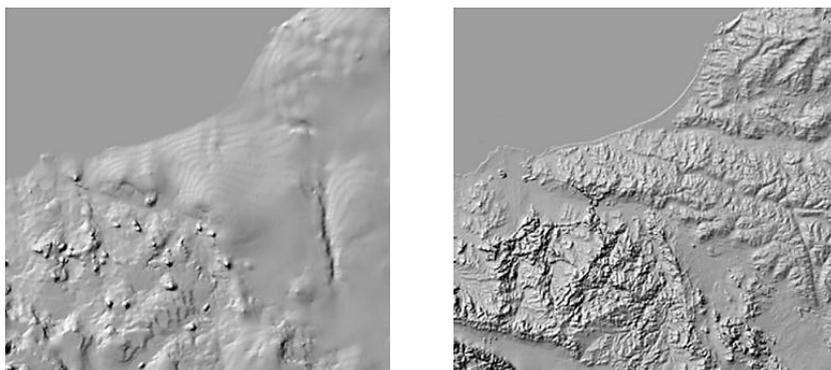


Рисунок 2.14.
Сравнение ЦМР GTOPO30
и GMTED2010: а)
GTOPO30, б) GMTED2010

ЦМР GMTED2010 доступна в трех разрешениях: 30 угловых секунд (приблизительно 900 м), 15 угловых секунд (500 м) и 7.5 угловых секунд (250 м). ЦМР охватывает область земного шара между 84° с.ш. и 56° ю.ш.. Некоторые области, а именно Гренландия и Антарктида, не представлены в разрешениях 15 и 7.5 угловых секунд в силу того, что использованные для этих областей источники не поддерживали такое разрешение.

В основу GMTED2010 положено 11 растровых источников (табл. 2.2). В первую очередь, это SRTM Void Filled. Остальные источники были использованы для областей, непокрытых SRTM Void Filled, а также для заполнения отсутствующих в SRTM Void Filled данных.

Таблица 2.2 Источники GMTED2010

Источник	Покрытие, %
SRTM	69,92
Antarctica satellite radar and laser altimeter DEM	13,80
DTED® 1	8,71
CDED3	2,26
CDED1	2,24
Greenland satellite radar altimeter DEM	1,79
NED – Alaska	1,01
15-arc-second SPOT 5 Reference3D	0,16
GTOPO30	0,09
NED	0,01
GEODATA 9 second DEM version 2	0,0004

Такие характеристики как система координат, единицы измерений отличаются друг от друга в использованных источниках. В результирующей

ЦМР все координаты приведены к системе WGS84 и выражены в градусах, значения высот приведены к метрам.

Точность по высоте у различных источников также различается. Общую точность можно оценить с помощью разрешения и средней квадратичной ошибки. Для разрешения 30 угловых секунд средняя квадратичная ошибка варьируется в диапазоне от 25 до 42 м, для 15 угловых секунд от 29 до 32 м, для 7,5 угловых секунд от 26 до 30 м.

GMTED2010 поставляется в виде тайлов размером $20^{\circ} \times 30^{\circ}$ (рис. 2.15). GMTED2010 Viewer предоставляет возможность загрузить выбранной тайл в любом из поддерживаемых GMTED2010 разрешении в неупакованном виде в формате GeoTIFF.

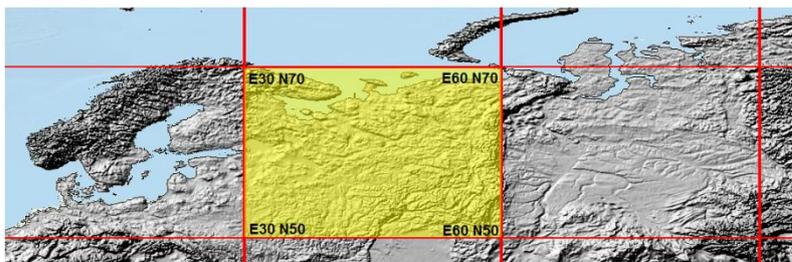


Рисунок 2.15. Интерфейс GMTED2010 Viewer (выделен тайл, покрывающий территорию Архангельской области)

В зависимости от источника, примененного в определенной области, в GMTED2010 могут встречаться артефакты. К примеру, некоторые области, полученные из DTED® 1, особенно на территории Евразии, подвержены таким артефактам, как чередующиеся полосы.

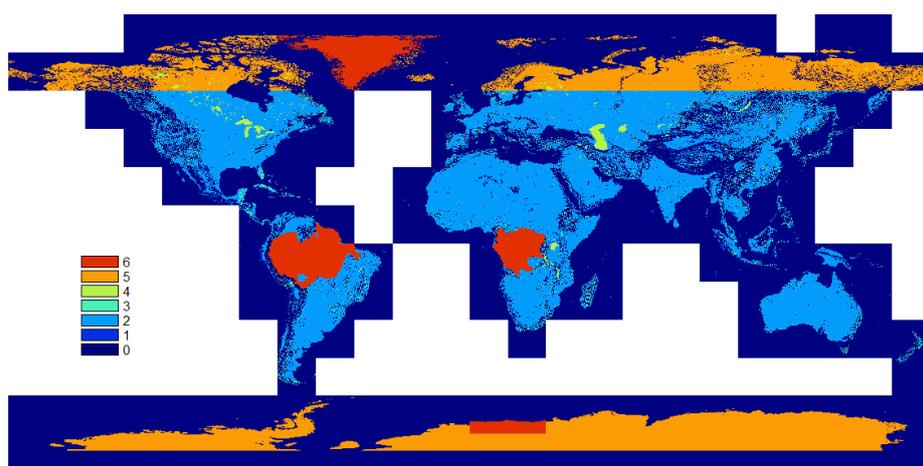
В других областях, в которых пустоты заполнялись данными GTOPO30, может быть затруднен процесс анализа поверхности из-за относительно плохого качества GTOPO30. Но такие области очень малы, составляют приблизительно 0,09 % ЦМР.

GMTED2010 доступна для загрузки с помощью веб-приложения GMTED2010 Viewer. Приложение поставляется сервером USGS и находится по адресу http://topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer/viewer.htm.

Глобальные ЦМР GTOPO30, SRTM, SRTM Void Filled и GMTED2010 доступны для загрузки при помощи USGS EarthExplorer клиент-серверного

веб-приложения Геологической службы США. Приложение доступно по адресу <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

ACE2 (Altimeter Corrected Elevations 2) – это глобальная цифровая модель рельефа, разработанная сотрудниками Лаборатории дистанционного зондирования Земли (Earth and planetary remote sensing laboratory, EAPRS Laboratory). ACE2 является второй версией глобальной ЦМР ACE. В основу ACE2 легли такие глобальные ЦМР, как SRTM, SRTM Void Filled, GLOBE и



ACE (рис. 2.16, табл. 2.3).

Рисунок 2.16.
Источники ЦМР ACE2

Таблица 2.3 Источники ЦМР ACE2

Код	Источник
0	SRTM (выше 60° с.ш. GLOBE, ниже 60° ю.ш. ACE)
1	SRTM Void Filled и/или данные альтиметров
2	SRTM, скорректированная данными ERS1 Geodetic Mission
3	SRTM, скорректированная данными EnviSat & ERS-2 data
4	Водные объекты
5	GLOBE, ACE
6	ERS-1 Geodetic Mission, ERS-2, EnviSat

Поверхность земного шара между 60° с.ш. и 60° ю.ш. представлена данными SRTM и SRTM Void Filled, скорректированными данными, полученными с помощью спутниковых радиолокационных альтиметров в ходе проекта ERS1 Geodetic Mission. Области земного шара, находящиеся за пределами 60° с.ш. и 60° ю.ш. представлены данными ЦМР GLOBE и ACE, скорректированными данными ERS1 Geodetic Mission.

АСЕ2 представлена в четырех разрешениях: 3 угловые секунды (приблизительно 90 м), 9 угловых секунд (270 м), 30 угловых секунд (900 м) и 4 угловые минуты (7,2 км.).

АСЕ2 доступна для загрузки с сервера EAPRS Laboratory по адресу <ftp://tethys.eaprs.cse.dmu.ac.uk/> через протокол передачи файлов. ЦМР распространяется в виде тайлов размером $15^{\circ} \times 15^{\circ}$. Каждый тайл представлен файлом .АСЕ2, упакованным в .gz архив. Кроме данных высот по каждому доступному разрешению имеются дополнительные данные, такие как, матрицы источников и матрицы качества, представляющиеся из себя растровые маски с соответствующими значениями. Координаты выражены в градусах широты и долготы в системе WGS84. Значения высоты выражены в метрах. На рис. 2.17 показан фрагмент ЦМР АСЕ2 на территории Архангельской области.

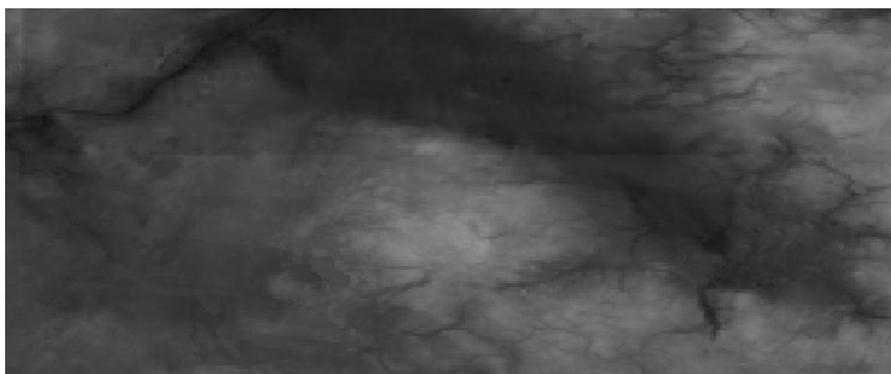


Рисунок 2.17.
Фрагмент ЦМР АСЕ2
на территории
Архангельской области

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM (Global Digital Elevation Model) – глобальная цифровая модель рельефа, разработанная Министерством экономики, торговли и промышленности Японии (Ministry of Economy, Trade, and Industry, METI) и Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства США.

Министерством экономики, торговли и промышленности Японии был создан усовершенствованный спутниковый радиометр теплового излучения и отражения (ASTER) и запущен в декабре 1999 года на борту спутника NASA. Сенсор имеет возможность стереоскопической съемки вдоль полосы пролета

с помощью двух телескопов, снимающих в надир и назад в ближнем инфракрасном диапазоне с отношением база-высота (base-to-height ratio) – 0.6. Пространственное разрешение в плане – 15 метров. Одна сцена ASTER в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне имеет размер 4,100 на 4,200 элементов, что соответствует 60x60 км на поверхности Земли.

ЦМР ASTER GDEM существует в 3 версиях: v1 – разрешение 7,5 угловой секунды; v2 – разрешение 1 угловая секунда; v3 – то же разрешение, что и у v2, но, по утверждению разработчиков, данная версия «очищена» от артефактов. Проведенное диссертантом сопоставление показало полную идентичность 2 и 3 версии для исследуемого региона.

Для создания ЦМР ASTER GDEM использовался архив данных радиометра ASTER, состоящий из 1,5 миллионов сцен. ASTER GDEM имеет разрешение 1 угловая секунда и охватывает поверхность земного шара между 83° с.ш. и 83° ю.ш. Координаты выражены в градусах широты и долготы в системе WGS84. Значения высоты выражены в метрах. Точность по высоте составляет 20 м. Этапы создания ЦМР включали в себя: стерео-корреляцию для создания 1264118 ЦМР на базе данных ASTER, маскирование облачности с целью убрать «облачные» пиксели, стэки проверенных на облачность ЦМР, фильтрация неправильных значений и выбросов, усреднение выбранных данных для получения окончательных значений и исправление остаточных аномалий перед «нарезкой» данных на фрагменты размером 1°x1°.

ASTER GDEM охватывает поверхность суши между 83° с.ш. и 83° ю.ш. и насчитывает 22,600 фрагментов размером 1°x1°. Оставлены фрагменты, насчитывающие минимум 0.01% поверхности суши. ASTER GDEM распространяется в формате GeoTIFF в географической системе координат (широта/долгота) и разрешением 1 угловая секунда (примерно 30 метров).

Результаты оценки точности ASTER GDEM для CONUS по растровым данным, включая класс воды (NLCD) и три агрегированных класса приведены в таблице 2.4. Все значения в метрах.

Таблица 2.4 Результаты оценки точности ASTER GDEM для CONUS
(http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=17&table=Usluga_Produkt)

Класс	Среднее	Стд.отклон	RMSE
Весь CONUS	-3.64	8.75	10.87
Вода	-1.32	15.71	16.53
Застройка	-4.06	6.94	9.06
Лес	1.72	9.93	10.93
Открытые территории	-6.40	7.31	10.33
Исключая воду, лед и снег	-3.77	8.19	10.46

ASTER GDEM поставляется в виде тайлов размером $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ в формате GeoTIFF (рис. 2.18). В качестве специальных значений выбраны -9999 для обозначения отсутствующих данных и 0 для водных объектов. Каждый тайл ASTER GDEM представляет из себя zip-архив, содержащий два файла: файл высот (DEM) и файл контроля качества (QA). Неправильные или аномальные значения в ASTER GDEM частично заменены данными из других глобальных ЦМР: SRTM, NED, CDED, Alaska DEM. ЦМР ASTER GDEM доступна для загрузки с сервера Центра анализа данных дистанционного зондирования (Earth Remote Sensing Data Analysis Center, ERSDAC) по адресу <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>, с помощью USGS EarthExplorer.

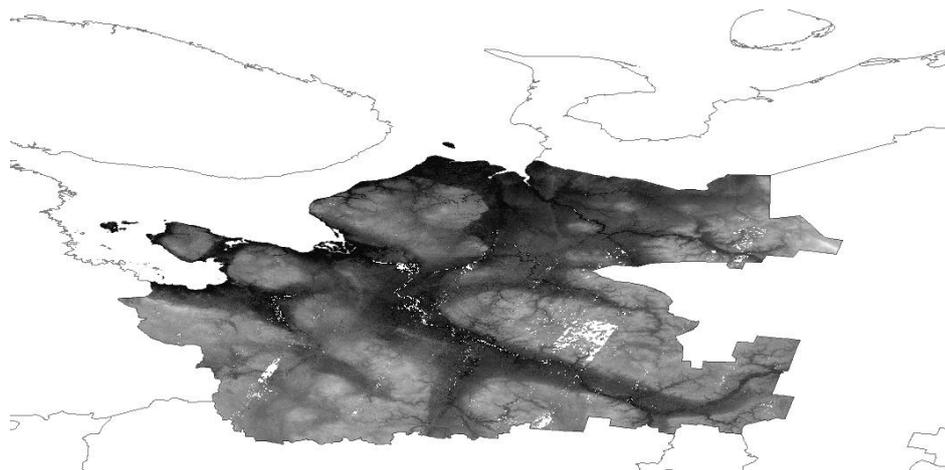


Рисунок 2.18. Данные ASTER GDEM на территории Архангельской области

На использование данных ASTER GDEM действуют следующие ограничения: 1) распространять данные ASTER GDEM можно только физическим лицам в рамках организации или проекта, а также в ответ на

запрос организаций, работающих в рамках чрезвычайных происшествий; 2) при демонстрации или публикации данных ASTER GDEM необходимо включать ссылку “ASTER GDEM is a product of METI and NASA”. Производные от ASTER GDEM продукты можно распространять в том случае, если из данных продукта невозможно извлечь оригинальные данные без потерь.

В ASTER GDEM присутствует ряд артефактов, аномальных значений, часть которых была заменена значением -9999. Особенно это свойственно территории Евразии севернее 60° (рис. 2.19).



Рисунок 2.19. Артефакты ASTER GDEM на территории Архангельской области, замененные значением -9999: выделены красным

ETOPO2. Etopo2 – глобальная цифровая модель рельефа, включающая как наземный, так и подводный рельеф (рис. 2.20), что выгодно отличает ее от большинства других цифровых моделей рельефа, таких как GTOPO30, SRTM и др. (<http://www.gisa.ru>).

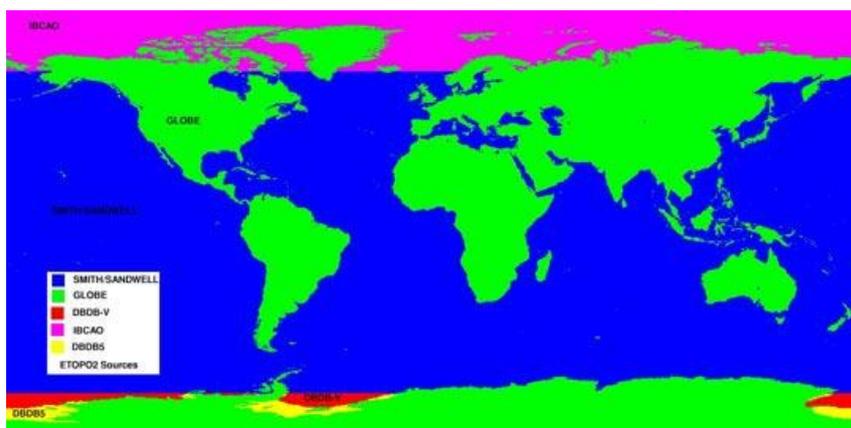


Рисунок 2.20. Источники данных на основе которых создана ETOPO2

ETOPO2 создан на основе нескольких источников (рис. 2.20) : для топографии суши использовались данные GLOBE – Global Land One-kilometer Base Elevation (разрешение 30 угловых секунд, 1 км), для батиметрии основной части морской поверхности - определенным образом

обработанные данные радарной альтиметрической съемки 1978 года совмещенные с данными по гравитационным аномалиям для получения глубин.

В «сыром» виде данные доступны по адресу: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO2/>. «Скачать» данные можно в формате Arcinfo binary GRID, 49Мб. Прилагается простая легенда. Открыть можно в любом программном пакете ESRI (Arcview, ArcGIS, Arcinfo и т.д.). Скачать данные также можно в формате GeoTIFF, 49Мб. Можно открыть в QGIS, ERDAS, а также продуктах ESRI.

Данные распространяются единой матрицей размером 10800x5400 пиксел, размер пиксела 2/60 градуса. Данные находятся в географической системе координат, эллипсоид – WGS84.

Высокоточная цифровая модель рельефа ArcticDEM. Модель создана Полярным геопространственным центром университета Миннесоты и его партнёров, в том числе Esri и доступна в следующих разрешениях: 2 м, 10 м, 32 м, 100 м, 500 м и 1 км. Большая часть ArcticDEM была разработана из панхроматических каналов снимков, полученных со спутников WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3. Небольшой процент данных был также получен со спутника GeoEye-1. Покрытие снимков на территорию Арктики показано на рис. 2.21.

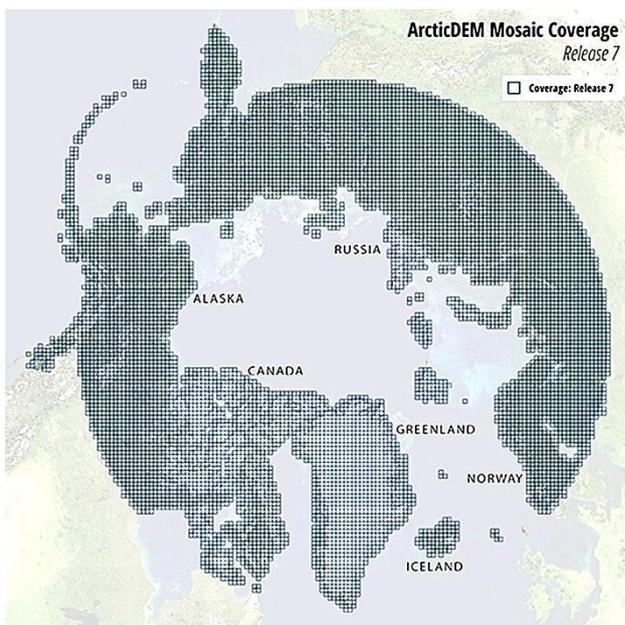


Рисунок 2.21. Покрытие сценами на Арктику

Скачать данные можно несколькими способами: 1) скачать оригинальные растры из официального HTTP-репозитория. Индекс нужного квадрата с данными определяется индексной схеме; 2) через специальное веб-приложение от Esri NGA ArcticDEM Web Map и NGA REMA Web App; 3) через Living Atlas и AGOL (доступны по 22 веб-карты на основе ЦМР); 4) через специализированное веб-приложение от Esri Arctic DEM Explorer; 5) через настольные приложения (например, ArcGIS Pro).

2.3 Выбор базовой ЦМР для геоэкологического районирования территории

При выборе базовой модели, кроме вышеизложенных природных факторов (глава 1), определяющих разрешение и точность ЦМР, учитывались также покрытие территории, однородность исходного материала, отсутствие артефактов и пустот.

Анализ существующих глобальных ЦМР позволил диссертанту сделать следующие выводы:

- выбор глобальной цифровой модели рельефа для построения на ее основе производных продуктов основывается на целях и задачах исследования. Главным критерием необязательно должна быть детальность данных. Для некоторых областей задач вполне могут подойти и менее детальные ЦМР. Для других, таких как, например, расчет параметров рельефа для инженерных изысканий, разрешение ЦМР является главным критерием, т. к. позволяет в более полной мере оценить эти параметры;

- создание ЦМР (ЦММ, или цифровых моделей высот – ЦМВ) связано со значительными затратами времени и средств, в связи с этим имеет смысл использовать существующие глобальные модели высот, если их точность удовлетворяет требованиям текущего проекта. Ориентировочно, с помощью доступных на сегодняшний день глобальных ЦМР, можно получать выходные материалы в масштабах от 1:25000 и мельче, с появлением Arctic DEM уровня HRTI-4;

- учитывая площадь исследуемого региона наиболее оптимально использование цифровых моделей уровня DTED-2;

- исходя из изложенных выше предпосылок, рациональным является использование свободно распространяемых ЦМР, поскольку применение платных ЦМР позволяет оценить их качество и пригодность для геоморфометрического анализа только после их приобретения;

- среднemasштабные ЦМР для равнинных территорий, к которым относится и исследуемый район, по нерегулярной сети высотных отметок характеризуются значительным количеством артефактов, особенно в областях распространения сильно врезанных долин.

Наиболее распространенным методом построения цифровой модели рельефа, реализованным во многих ГИС-пакетах, является нерегулярная триангуляционная сеть (triangulated irregular network – TIN). Результат визуального анализа построенной этим методом цифровой модели рельефа для части территории (Беломорско-Кулойское плато) оказался наихудшим среди применяемых методов (Гофаров и др., 2006). Особенно искажают рельеф артефакты, связанные с недостатком опорных точек, визуально выглядящие как плоские треугольники с резкими гранями. Также этот метод показал плохие результаты в областях с сильно врезанными долинами. В этих местах наблюдается сильная зубчатость цифровой модели рельефа на склонах, вызванная недостатком опорных точек на дне долин и неспособностью этого метода эффективно сглаживать подобные элементы рельефа. Таким образом, можно сказать, что построение среднemasштабной цифровой модели рельефа для равнинных территорий по нерегулярной сети высотных отметок методом TIN нецелесообразно;

- ни одна из рассмотренных моделей не является ЦМР или ЦММ в «чистом» виде, т.е. в зависимости от степени развития растительного покрова, модель может быть или моделью рельефа или моделью местности. Это обстоятельство искажает значения ряда геоморфометрических параметров;

Сравнив актуальные на сегодняшний день глобальные цифровые модели рельефа (распространяемые свободно), можно сделать вывод о том, какие из них наиболее полно удовлетворяют задачи расчета параметров рельефа Архангельской области (табл. 2.5).

Таблица 2.5 Сравнение глобальных ЦМР

ЦМР	Разрешение	Точность по высоте, м (абсолютная/относительная)
GTOPO30	30 угловых секунд	15-500 в зависимости от региона
SRTM	1 угловая секунда – США 3 угловые секунды – другие территории	30/20
GMTED2010	30 угловых секунд 15 угловых секунд 7,5 угловых секунд	варьируется в зависимости от источника
ACE2	3 угловые секунды 9 угловых секунд 30 угловых секунд 4 угловые минуты	1-16
ASTER GDEM	1 угловая секунда	18/12
ArcticDEM	2 метра	1-3

Наиболее точными из вышеперчисленных моделей по разрешению являются модели SRTM, ASTER GDEM v2 и ArcticDEM. Первая из них практически не нуждается в подготовке и устранении артефактов и пустот, но не покрывает полностью территорию Архангельской области, а, соответственно, была исключена из выбора. Остальные модели, такие как GTOPO30, GMTED2010, ACE2, ETOPO и др. имеют не только более грубое разрешение, но и достаточно неоднородны по используемому исходному материалу, что влечет за собой точность меняющуюся от региона к региону. К тому же во всех этих ЦМР для коррекции использовались данные SRTM, которые не охватывают территорию исследования.

По пространственному разрешению, несомненно, самой точной является ЦМР ArcticDEM (в версии 2-метровой точности). Однако она

сформирована не в результате единой миссии, а «сшита» из разновременных панхроматических оптических снимков. Сопоставление ЦМР ASTER GDEM v2 и ArcticDEM (рис. 2.22, табл. 2.6) показало значительное количество артефактов, что вполне закономерно при использовании оптических снимков в районах с высокой облачностью.

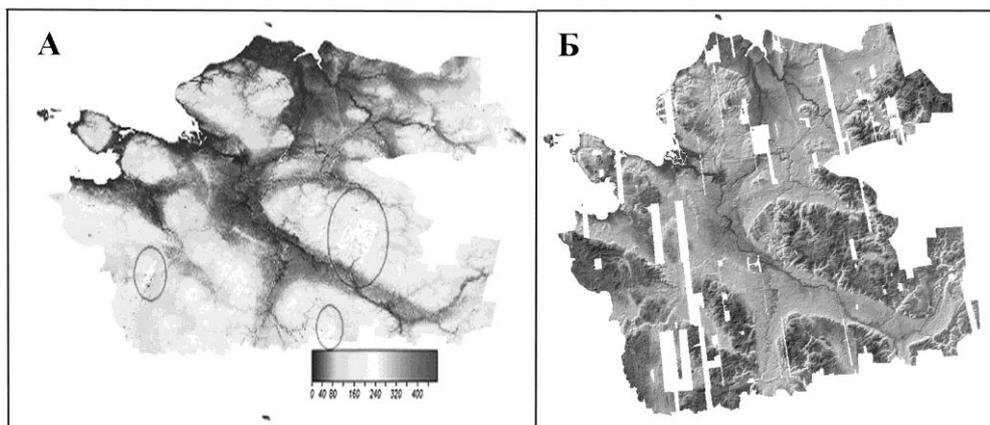


Рисунок 2.22. Сравнение необработанных («сырых») данных ASTER GDEM v2 (А) и ArcticDEM Release 7 (Б) на территорию Архангельской области:

Таким образом, наиболее же оптимальная из оставшихся ЦМР является ASTER GDEM v2, как имеющая самое детальное пространственное разрешение (~ 30 м) в сочетании с точностью по высоте и однородности исходного материала (результат миссии с одинаковым сенсором), минимальным количеством пустот (табл. 2.6).

Таблица 2.6 Сравнение необработанных данных ArcticDEM Release 7 и ASTER GDEM v2 на территорию Архангельской области

ЦМР	Количество пустот, % от площади	Количество точек со значением высоты меньше 0, % от площади	Количество точек со значением высоты больше 250 метров, % от площади
ArcticDEM Release 7	14,49	0,002	0,53
ASTER GDEM v2	1,24	0,30	0,46

Алгоритм выбора ЦМР показан на рис. 2.23.

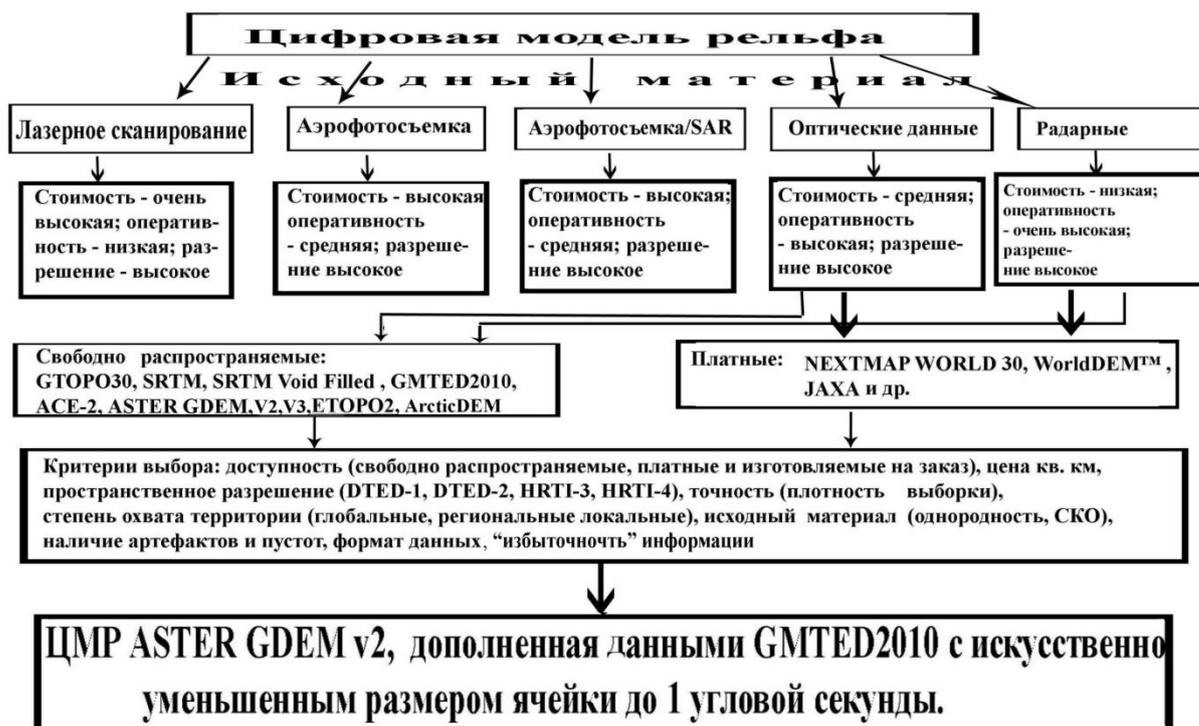


Рисунок 2.23. Упрощенный алгоритм выбора цифровой модели рельефа

Кроме вышеперечисленных параметров ЦМР при выборе модели учитывалась также избыточность информации при решении поставленных задач, о чем будет подробно сказано далее.

2.4 Выбор геоинформационной системы оптимальной для построения цифровой модели рельефа и расчета параметров рельефа Архангельской области

Вторым этапом исследования был выбор программного обеспечения для обработки ЦМР.

Программных продуктов, реализующих функции геоинформационных систем, достаточно много. В целом все они обладают схожим набором возможностей, но одни из них делают упор на решение каких-либо определенных задач, например, расчет характеристик рельефа, а другие пытаются охватить как можно более широкий круг задач. Кроме того, выбор той или иной геоинформационной системы основывается на доступности программного продукта, так как некоторые из них распространяются под

свободной лицензией, а другие – продукты платные. В любом случае, выбор геоинформационной системы основывается на совокупности факторов (рис. 2.24).

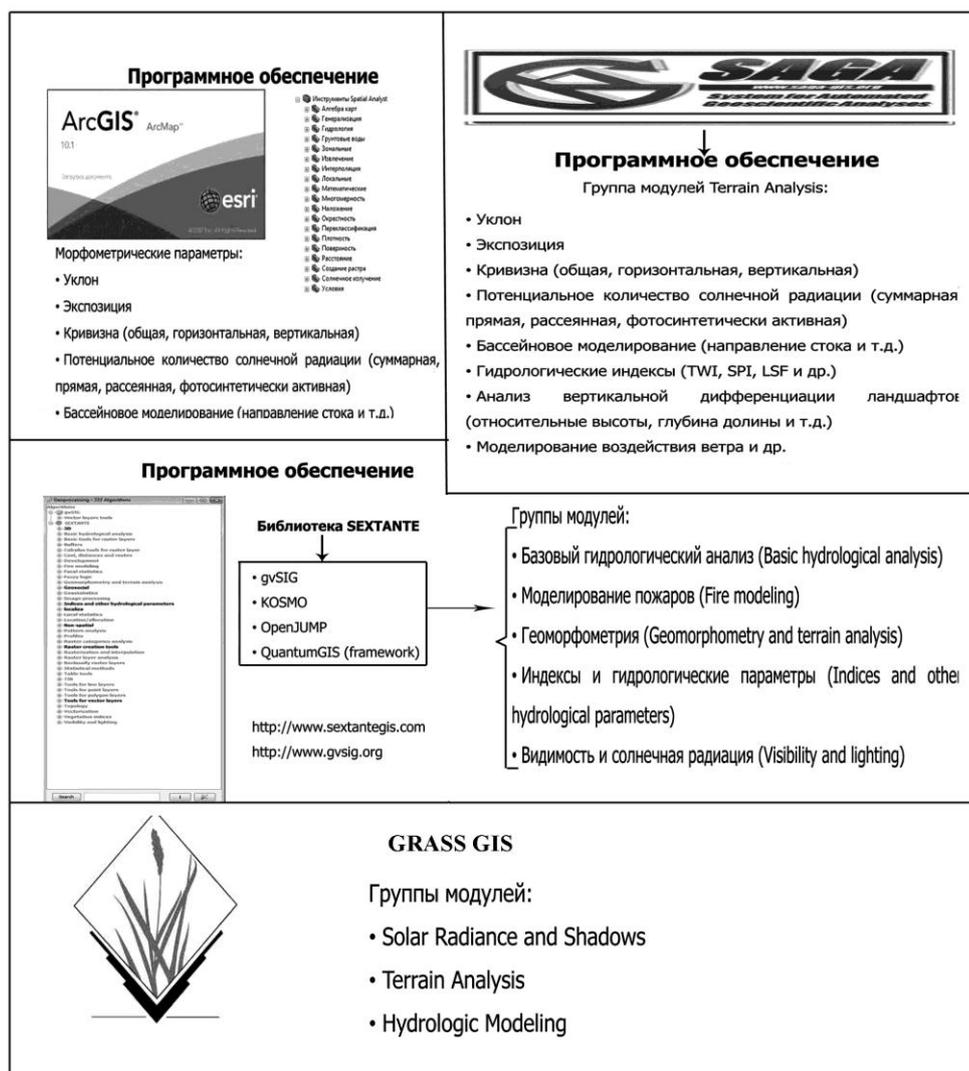


Рисунок 2.24. Сопоставление модулей обработки рельефа в ГИС-программах

Поэтому в ходе исследования был проведен сравнительный анализ наиболее распространенных ГИС программ, их возможностей, методов обработки рельефа и выбор оптимальных. Обычно при использовании той или иной ГИС исследователи применяют то программное обеспечение (ПО), которое имеется в наличии. Появление ГИС свободного доступа позволило расширить область анализируемых ГИС.

Программное обеспечение делится на проприетарное (платное) и открытое (свободного доступа). К проприетарному относятся: ArcGIS for

Desktop (модуль Spatial Analyst); MapInfo (модуль Vertical Mapper); ENVI; IDRISI и др. К открытому программному обеспечению относятся: SAGA (System for Automated Geoscientific Analysis); GRASS (Geographic Resources Analysis Support System); SEXTANTE; Whitebox Geospatial Analysis Tools и др. Наиболее часто используются ГИС ArcGIS, Mapinfo, и, частично, GRASS. Каждая имеет свои достоинства и недостатки. Практически все ГИС имеют схожие по решаемым задачам модули или в них используются одни и те же модули, например библиотека SEXTANTE для ГИС Quantum GIS и gvSIG. Процесс выбора ГИС для исследования рельефа региона на основе ЦМР показан на рис. 2.25.



Рисунок 2.25. Алгоритм выбора оптимальной ГИС

При выборе конкретной ГИС для анализа картографических данных необходимо учитывать широкий спектр характеристик системы: поддерживаемые функции системой, наличие русификации интерфейса, надежность работы, расширения функциональности.

В ходе исследования диссертантом был проведен анализ наиболее распространенных ГИС: ESRI ArcGIS (модуль Spatial Analyst); MapInfo (модуль Vertical Mapper); SAGA (модуль Terrain Analysis); GRASS; QGIS (Quantum GIS); gvSIG (модуль SEXTANTE) и др.). Т.е. анализировались модули обработки ЦМР рельефа, входящие в структуру ГИС или привлекаемых из других ГИС. Сравнение основных открытых пользовательских ГИС (Дубинин, Рыков, 2010) и некоторых проприетарных аналогов приведено в таблицах 2.7 и 2.8. Каждая ГИС имеет свои достоинства и недостатки. При работе с векторными и растровыми данными наиболее привлекательны GRASS, QGIS, gvSIG и, в несколько меньшей степени, SAGA, поскольку работает только с внешними базами данных.

Таблица 2.7 Сравнение основных открытых пользовательских ГИС

		Открытые						
		GRASS 6.40	QGIS 1.4	uDig 1.1	gvSIG 1.9	SAGA 2.04	MapWindows 4.7	ILWIS 3.4
Лицензия		GPL	GPL	LGPL	GPL	MPL	GPL	GPL
Чтение векторных данных	SHP	+	+	+	+	+	+	+
	GML	+	+	+	+	-	+	-
	DXF	+	+	-	+	+	+	+
Запись векторных данных	SHP	+	+	+	+	+	+	+
	GML	+	+	+	+	-	-	-
	DXF	+	-	-	+	-	-	+
Чтение растровых данных	JPEG	+	+	+	+	+	+	+
	GeoTIFF	+	+	+	+	+	+	+
	ECW	+	-	-	+	+	+	+
	ARC/Info GRID	+	+	-	-	+	+	+
Запись растровых данных	JPEG	+	+	+	+	+	+	+
	GeoTIFF	+	+	+	+	+	+	+
	ECW	+	+	-	-	+	-	-
	ARC/Info GRID	-	-	-	-	-	-	-
Базы данных Ч=чтение З=запись	PostGIS	З+Ч	З+Ч	З+Ч	З+Ч	-	З+Ч	З+Ч
	ARCSDE	-	-	З+Ч	З+Ч	-	-	З+Ч
	Oracle	Ч	-	З+Ч	З+Ч	-	-	З+Ч
Поддержка стандартов OGS		WMS, WFS, SFS, GML	WMS, WFS, WFS-T, SFS, GML	WMS, WFS, CSW, WFS-G	WMS, WFS, WCS	WMS, WFS	WCS, WFS	WMS, WFS, SFS, GML
Русскоязычный интерфейс		+	+	-	+	-	-	-
Русскоязычная документация***		+	-	-	+	-	-	-

*- реализуется за счет пользователей GRASS, ** - Через дополнительное расширение, *** - Руководство пользователя

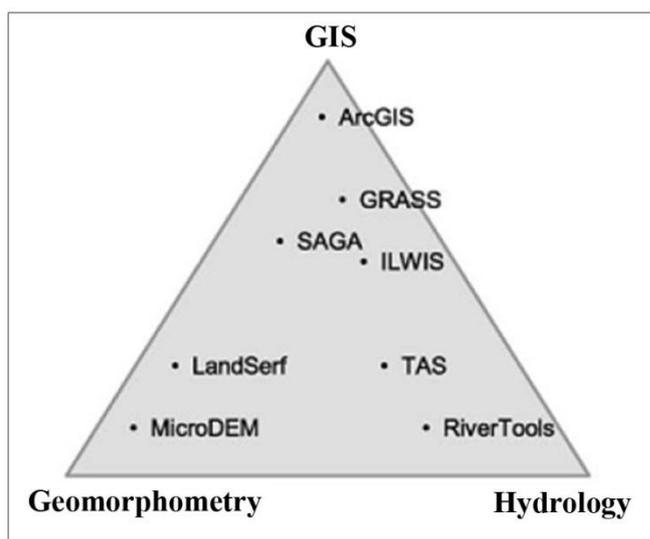
Таблица 2.8 Сравнение основных открытых пользовательских ГИС и некоторых проприетарных аналогов в части функциональности по созданию простых проектов

	GRASS	QGIS	uDig	gvSIG	SAGA	MapWindows	MapInfo	ArcView
Общие								
Актуальная версия	6.4	1.5	1.2	1.9	2.04	4.7	10.0	9.3
Работа в Windows	+	+	+	+	+	+	+	+
Работа в Linux	+	+	+	+	+	-	-	-
Единый файл проекта	+	+	-	+	+	+	+	+
Относительные ссылки	-	+	-	-	+	+	+	+
Поиск потерянных источников данных	-	+	-	+	-	+	+	+
Несколько видов (карт) в одном проекте	-	-	+	+	+			-
Условные обозначения								
Условные обозначения во внешнем файле - вектор	-	+	-	+	+	+	+	+
Условные обозначения во внешнем файле - растр	-	+	-	+	+	-	-	+
Группы слоев	+	+	-	+	-	+	-	+
Полные условные обозначения в списке слоев	-	+	-	-	-	+	-	+
Прозрачность - вектор	+	+	-	-	+	+	+	+
Прозрачность - растр	+	+	+	+	+	+	+	+
Тип легенды: цветовая карта (классификация) для растров	+	+	-	-	+	-	-	+
Тип легенды: уникальное значение - вектор	+	+	+	+	+	+	+	+
Обзорная карта								
Обзорная карта с векторными слоями	+	+	-	+	+	+	-	+
Обзорная карта с растровыми слоями	+	+	-	+	+	+	-	+
Сохранение обзорной карты в проекте	+	-	-	+	+	+	-	+

Таблица 2.8 – продолжение

Работа с кириллицей								
Использование кириллицы в названиях слоев	+	+	+	+	+	+	+	+
Запуск проекта из папки с кириллицей в названии проекта	+	+	+	+	+	+	+	+
Добавление данных из папки с кириллицей в названии	+	+	+	+	+	+	+	+

Сопоставление возможностей ПО по решаемым задачам обработки ЦМР показало, что при решении задач геоморфометрии и гидрологии наиболее предпочтительно выглядит ArcGIS (рис. 2.26). Среди открытого



программного обеспечения – это GRASS и SAGA.

Рисунок 2.26. Распределение ПО по решаемым задачам обработки ЦМР (<http://sovzond.ru>)

ГИС SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses, <http://www.saga-gis.org>), которая обновляется раз в год. К тому же, данное ПО обладает достаточно мощным инструментарием для обработки рельефа. Группа модулей Terrain Analysis включает в себя определение следующих параметров (<http://sovzond.ru>): уклон, экспозиция, кривизна (общая, горизонтальная, вертикальная), потенциальное количество солнечной радиации (суммарная, прямая, рассеянная, фотосинтетически активная), бассейновое моделирование (направление стока и т.д.), гидрологические индексы (TVW, SPI, LSF и др.), анализ вертикальной дифференциации

ландшафтов (относительные высоты, глубины долин и т.д.), моделирование воздействия ветра и др.

Конструктивно SAGA состоит из набора модулей, разделенных по назначению. Например, модуль пространственного анализа. В силу того, что SAGA GIS является «выходцем» из академической среды, посредством таких модулей в ней реализовано множество аналитических алгоритмов. Версия 2.1.1, вышедшая в 2014 году, насчитывает 68 модулей, в которых реализовано 652 метода.

Работа с SAGA осложняется отсутствием русификации программы и руководства пользователя. Но она ориентирована на географический анализ и обладает широким спектром соответствующих функций.

Благодаря акцентированию на работе с растрами SAGA GIS предоставляет удобный набор инструментов для обработки космических снимков и подготовки на их основе цифровых моделей рельефа, к таким инструментам можно отнести: растровые фильтры (фильтр Гаусса, фильтр Лапласа, фильтр Ли и другие); растровый калькулятор; разбивка на тайлы, склейка в мозаику, слияние растров, разность растров и другие растровые инструменты.

Таким образом, учитывая задачи исследования, наиболее пригодной для геоморфометрического анализа рельефа является SAGA GIS.

2.5 Подготовка цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ЦМР ASTER GDEM v2

Любая ЦМР нуждается в предварительной подготовке для решения определенных задач. Не является исключением ASTER GDEM Подготовка ЦМР территории Архангельской области включала в себя следующие операции: 1) извлечение и объединение данных; 2) замену аномальных значений высотных отметок и «пустот»; 3) устранение шероховатостей, шума и ошибок, возникающих при наложении снимков; 4) заполнение

впадин. Все операции производились в свободном программном продукте SAGA GIS (<http://www.saga-gis.org>).

Архангельская область покрыта 91 сценой ASTER GDEM v2. Для подготовки цифровой модели области исследования и последующего анализа параметров рельефа на ее основе сцены ASTER GDEM было необходимо объединить и извлечь только те данные, которые располагаются в границах области. Сцены были получены с сервера Геологической службы США (<http://earthexplorer.usgs.gov>) и загружены в SAGA GIS с помощью открытой библиотеки GDAL. Далее встроенными методами из всего набора были извлечены только те данные, которые расположены в границах области.

Сцены ASTER GDEM распространяются в формате GeoTIFF, а SAGA GIS имеет в своей структуре модуль GDAL: Import Raster, использующий открытую библиотеку преобразования растровых и векторных форматов GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), позволяющую работать и с GeoTIFF. С помощью данного модуля полученные сцены были загружены в SAGA GIS и объединены в одну сцену. Объединение (создание мозаики) сцен было выполнено с помощью модуля Mosaicking. Модуль Mosaicking SAGA GIS в прежних версиях геоинформационной системы имел название Merge Grids. Следует отметить, что работа этого модуля принципиально отличается от понимания мозаики заложенной в ArcGIS. Если в ArcGIS мозаика – это «контейнер» со ссылками на растровые данные (сцены), то в SAGA GIS создание мозаики – это объединение нескольких сцен в одну.

Библиотека GDAL определяет значение отсутствующих данных в наборе ASTER GDEM равным -32767. Некоторые ошибочные данные в данной ЦМР были удалены разработчиками из модели и заменены значением -9999. Таким образом, для дальнейшей работы значения пустот было необходимо привести к единому виду. Для этого диссертантом использовался модуль Grid Calculator. Данный модуль из существующих растров позволяет конструировать новый, в ячейках которого значения вычисляются из значений соответствующих ячеек входных растров по

математической функции. Переменные функции – это значения входных растров, обозначенных либо в алфавитном порядке (a – значение в текущей ячейке первого растра, b – второго растра, и так далее), либо с помощью буквы g и порядкового номера входного растра ($g1$ – значение в текущей ячейке первого растра, $g2$ – значение в текущей ячейке второго растра, и так далее). Кроме того SAGA GIS предоставляет набор математических операторов (например, $+$ – сложение, $*$ – умножение), математических функций (например, \sqrt{x} – корень, $\sin(x)$ – синус) и функций сравнения и ветвления ($gt(x, y)$ – больше, $lt(x, y)$ – меньше), с помощью которых можно составить результирующую функцию. Полный список доступных функций приведен в документации SAGA GIS (<http://www.saga-gis.org>).

Чтобы привести значения пустот в наборе данных ASTER GDEM к единому виду был использован модуль Grid Calculator, где в качестве входного растра была указана мозаика объединенных сцен и построена следующая функция:

$$ifelse(eq(g1,-9999),-32767,g1), \quad (2.1)$$

где $ifelse(c, x, y)$ – функция ветвления, значение которой равняется x , если $c=1$, иначе y ; $eq(x, y)$ – функция сравнения, значение которой равняется 1, если $x=y$, иначе 0; $g1$ – значение в текущей ячейке входного растра (объединенная мозаика).

Таким образом, в объединенном растре все отсутствующие данные были приведены к одинаковому значению -32767.

Следующим шагом было извлечение только тех данных, которые располагаются в области исследования. Граница Архангельской области в векторном формате доступна в наборе данных Vmap0.

Набор данных Vmap0 (Vector Map Level 0) разработан Национальным агентством геопространственной разведки США (NGA, National Geospatial Agency) на основе набора данных DCW (Digital Chart of the World) в 1990-х годах. Векторные данные в наборе оцифрованы с карт масштаба 1:1000000 и

снабжены атрибутами и текстовой информацией. Набор состоит из 10 тематических разделов по 50-70 карт: политические границы, оценка качества данных, высота, гидрография, население, транспорт, растительность и так далее. По географическому положению набор разделен на четыре библиотеки: Северная Америка; Европа и Северная Азия; Южная Америка, Африка и Антарктида; Южная Азия и Австралия (Neteler M., 2005).

Слой `bnd-political-boundary-a` из библиотеки Европы и Северной Азии состоит из набора полигонов, представляющих политические границы административно-территориальных единиц, в том числе Архангельской области. Каждый полигон имеет совокупность атрибутов, в которых представлена различная информация о каждой административно-территориальной единице, например, атрибут `NAM` содержит название. Для того чтобы из слоя `bnd-political-boundary-a` извлечь только границу Архангельской области было реализовано последовательное выполнение модулей `Select by Attributes (String Expression)` и `Copy Selection to New Shapes Layer`.

Модуль `Select by Attributes (String Expression)` осуществляет поиск строки в таблице атрибутов и выделяет те записи, в которых значение указанного атрибута содержит данную строку. Таким образом, в качестве аргументов модуля необходимо указать таблицу атрибутов слоя `bnd-political-boundary-a`, атрибут `NAM` и строку `ARKHANGEL'SKAYA OBLAST'`.

После того, как поиск записей был осуществлен, и в слое `bnd-political-boundary-a` выделены полигоны Архангельской области, с помощью модуля `Copy Selection to New Shapes Layer` были скопированы в новый векторный слой выделенные полигоны.

В итоге проведенных операций были получены два слоя данных: 1) растровый слой, содержащий объединенные сцены `ASTER GDEM` с приведенными к единому значению областями отсутствующих данных; 2) векторный слой, содержащий полигоны границы Архангельской области.

С помощью модуля SAGA GIS Clip Grid with Polygon, который из растрового слоя извлекает данные по границам полигона, была извлечена из набора данных ASTER GDEM v2 область исследования (рис. 2.27).

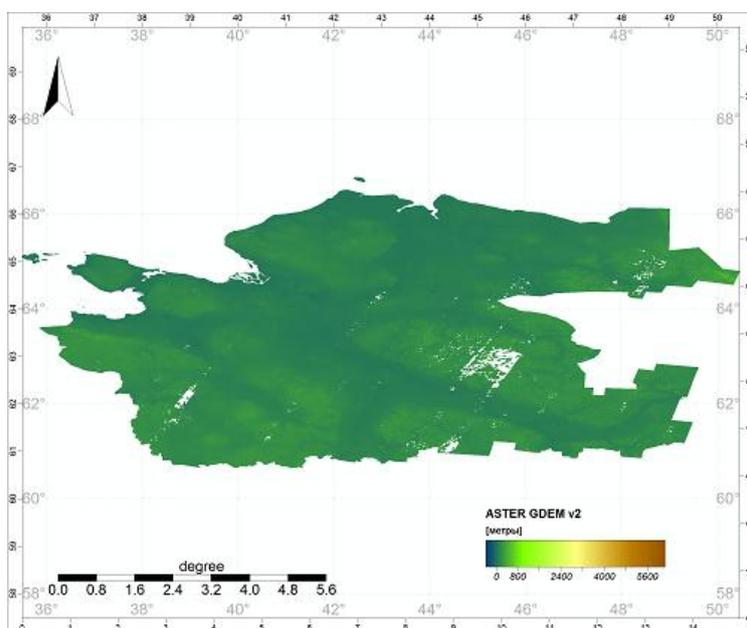


Рисунок 2.27. Исходная ЦМР ASTER GDEM v2 на территорию Архангельской области (система координат: WGS84, проекция: WGS84 (EPSG:4326))

В таблице 2.9 приведены статистические данные полученного растрового слоя (Минеев и др., 2015,б).

Таблица 2.9 Статистика ASTER GDEM для территории Архангельской области

Показатель	Значение
Количество непустых ячеек	708025923
Минимальное значение	-393
Максимальное значение	6255
Среднее арифметическое значение	103.15
Среднеквадратическое отклонение	59.07

2.5.1 Подготовка набора данных GMTED2010

Для заполнения недостающих данных в ЦМР ASTER GDEM v2 были использованы данные из ЦМР GMTED2010.

Сцены GMTED2010 распространяются так же в формате GeoTIFF, и так как Архангельская область покрыта одной сценой GMTED2010 (50n030e_20101117_gmted_mea075), необходимости создания мозаики нет.

Указав в качестве параметров модуля Clip Grid With Polygon сцену GMTED2010 и полигоны границы Архангельской области из набора Vmap0, были извлечены данные GMTED2010 в пределах области исследования (рис. 2.28). В таблице 2.10 приведены статистические данные ЦМР GMTED2010 на территорию Архангельской области (Минеев и др., 2015,б).

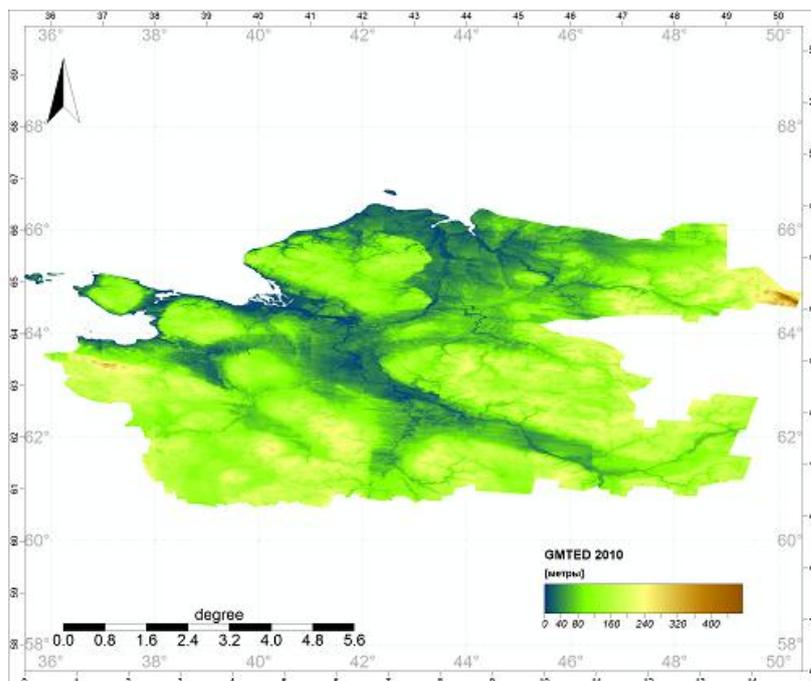


Рисунок 2.28. Данные GMTED2010 на территории Архангельской области (система координат: WGS84, проекция: WGS84 (EPSG:4326))

Таблица 2.10 Статистика GMTED2010 для территории Архангельской области

Показатель	Значение
Количество непустых ячеек	12734342
Минимальное значение	0
Максимальное значение	475
Среднее арифметическое значение	111.88
Среднеквадратическое отклонение	58.41

Глобальная цифровая модель рельефа ASTER GDEM v2 имеет размер ячейки, равный 1 угловой секунде (~30 м), размер же ячейки GMTED2010 равен 3 угловым секундам (~90 м). Для дальнейшей композиции этих двух моделей размер ячейки было необходимо привести к единому виду, то есть искусственно уменьшить размер ячейки GMTED2010 до 1 угловой секунды.

В SAGA GIS есть понятие системы растров (Grid System), которая характеризуется протяженностью растра и размером ячейки растра, поэтому в SAGA GIS процесс искусственного изменения размера ячейки можно рассматривать как процесс переноса растра из одной растровой системы в другую. Для этого служит модуль Resampling. В качестве аргументов модуль Resampling принимает растр и систему растров, в которую данный растр необходимо перенести. Система растров задается либо с помощью указания ее характеристик, либо с помощью выбора открытых на данный момент систем. Таким образом, указав в качестве входного растра слой GMTED2010 в пределах области исследования и систему растров слоя ASTER GDEM, размер ячейки GMTED2010 был искусственно уменьшен до 1 угловой секунды.

2.5.2 Заполнение недостающих данных в ASTER GDEM данными GMTED2010

При разработке ASTER GDEM v2 на территории России большинство таких артефактов, как резкие понижения (впадины) и повышения (пики) рельефа были удалены из цифровой модели, и на их месте образовались пустоты, области отсутствующих данных. В большинстве случаев наличие данных артефактов обусловлено экранированием территории облаками, недостаточным количеством наблюдений, отражением континентальных водоемов и несовпадений между цифровыми моделями, используемыми для построения глобальной модели (Tachikawa et al., 2011).

В структуру SAGA GIS входит модуль Patching, с помощью которого можно заполнить области отсутствующих данных растрового слоя данными другого растрового слоя. С помощью этого модуля диссертантом были устранены пробелы ASTER GDEM на территорию исследования данными GMTED2010 с искусственно уменьшенным размером ячейки (рис. 2.29).

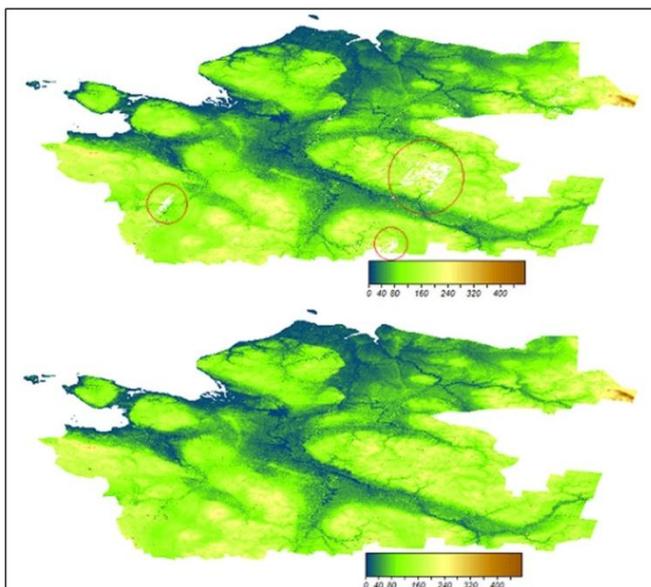


Рисунок 2.29. Заполнение пустот ASTER GDEM v2 данными GMTED2010 (система координат: WGS84, проекция: WGS84 (EPSG:4326)) (Минеев и др., 2015a)

В таблице 2.11 приведена статистика, характеризующая отсутствующие данные в ASTER GDEM, из которой видно, что площадь разрывов составляет 6913 км² (1.16 %) от общей площади исследований, что в принципе невелико, но учитывая размеры одиночных разрывов (до 1930 км²), необходима коррекция исходной модели (Минеев и др., 2015,б).

Таблица 2.11 ASTER GDEM для территории Архангельской области

Показатель	Площадь, км ²	Доля, %	Количество ячеек
Общая совокупность всех разрывов	6 913	1.16	8 277 029
Минимальный разрыв	900	0.00	1
Максимальный разрыв	1 930	0.30	2 144 552
Количество разрывов: 3882			

2.5.3 Статистический анализ для обнаружения аномальных значений

Значения высот на территории области исследования по данным ASTER GDEM лежат в диапазоне от -393 до 6255 (табл. 2.9). Граничные значения данного диапазона являются погрешностями в наблюдениях и не представляют высоту естественного рельефа. Реальные границы диапазона оценивались с помощью гистограммы зависимости значений от количества их вхождений в диапазон (рис. 2.30).

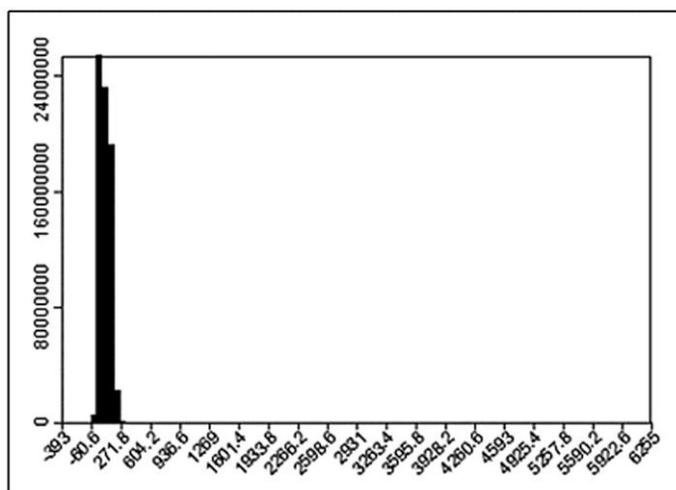


Рисунок 2.30. Гистограмма значений высоты рельефа по данным ASTER GDEM

Уточнить границы диапазона значений высоты можно с помощью методов обнаружения выбросов. В теории статистики выбросом называется наблюдение, значение которого численно удаленно от остальных значений в совокупности наблюдений. В целом наличие выбросов негативно влияет на анализ и получение корректных данных (Olewuezi, 2011; Seo, 2006).

Существует два типа методов обнаружения выбросов: формальные и неформальные тесты. Формальные тесты основываются на предположении о законе распределения и определяют выброс как отклонение от предполагаемого распределения. Неформальные тесты генерируют интервал значений (или некий критерий), значения, за пределами которого рассматриваются как выбросы. При этом неформальные тесты не позволяют сделать предположения о законе распределения (Seo, 2006; Olewuezi, 2011).

Так как мы не можем сделать корректное предположение о законе распределения высоты рельефа земной поверхности, следует воспользоваться одним из неформальных методов.

Существуют следующие неформальные тесты (Seo, 2006):

1) Метод среднеквадратического отклонения (3SD)

Самый простой неформальный метод обнаружения выбросов – метод среднеквадратического отклонения. Данный метод основывается на предположении о том, что выбросы находятся за пределами интервала:

$$(\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma), \quad (2.2)$$

где $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ – среднеквадратическое отклонение; \bar{x} – среднее арифметическое совокупности значений; n – количество значений.

2) Метод Z-Score

Данный метод, как и предыдущий также основывается на среднем арифметическом и стандартном отклонении. Для каждого значения в выборке вводится некое оценочное значение Z и, если оценка превышает в абсолютном значении 3, то значение выборки считается выбросом. Оценочное значение Z вычисляется по формуле:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (2.3)$$

3) Модифицированный метод Z-Score (Modified Z-Score)

Два предыдущих метода основываются на таких показателях, как среднее арифметическое и среднеквадратическое отклонение. Однако эти показатели неустойчивы в тех случаях, когда в выборке присутствуют экстремальные выбросы, намного удаленные от остальной выборки. Модифицированный метод использует другой показатель – медианное абсолютное отклонение (MAD):

$$MAD = \text{median}\{|x_i - m|\}, \quad (2.4)$$

где m – медиана выборки.

В данном методе также вводится некое оценочное значение M и, если оценка превышает в абсолютном значении 3.5, то значение в выборке считается выбросом. Оценка M высчитывается по формуле:

$$M_i = \frac{0.6745(x_i - m)}{MAD} \quad (2.5)$$

4) Метод абсолютного медианного отклонения (3MADe)

Данный метод похож на метод среднеквадратического отклонения с тем исключением, что в качестве показателя использует абсолютное медианное отклонение и основывается на предположении о том, что выбросы находятся за пределами интервала:

$$(m - 3MAD_e; m + 3MAD_e), \quad (2.6)$$

где $MAD_e = 1.483MAD$ для большой выборки значений; m – медиана выборки.

5) Правило медианы (Median Rule)

Правило медианы определяет интервал вероятных значений выборки, за пределами которого все значения рассматриваются как выбросы. Интервал рассчитывается по формуле:

$$(m - 2.3IQR; m + 2.3IQR), \quad (2.7)$$

где $IQR = |Q3 - Q1|$ – расстояние между нижним ($Q1$) и верхним ($Q3$) квартилями выборки, m – медиана выборки.

Для определения аномальных значений в цифровой модели рельефа области исследования диссертантом был написан сценарий на языке программирования Python, который позволяет рассчитывать вероятные диапазоны значений (и отбрасывать выбросы) по всем из пяти рассмотренных методов. В качестве входящего параметра сценарий принимает статистические данные растрового слоя, которые были получены с помощью модуля Zonal Grid Statistics SAGA GIS. Модуль Zonal Grid Statistics выводит в упорядоченном виде таблицу, в одном столбце которой все значения растрового слоя, а в другом количество их вхождений.

Из рисунка 2.31 видно, что неформальные методы дают достаточно близкие результаты на относительно небольших выборках. Но модифицированный метод Z-Score, метод абсолютного медианного отклонения и правило медианы (методы, которые не основываются на среднем арифметическом и стандартном отклонении), более устойчивы к наличию экстремальных выбросов в больших наборах данных (Минеев и др., 2015, а, б), поэтому лучше использовать их. Так как метод абсолютного медианного отклонения работает быстрее на больших наборах данных, то данный метод был применен для обнаружения выбросов в цифровой модели области исследования. Образовавшиеся пустоты на месте аномальных значений были заменены соответствующими значениями из набора данных

ASTER GDEM. Таким образом, диапазон значений был ограничен от начального (-393; 6255) до (0; 475).

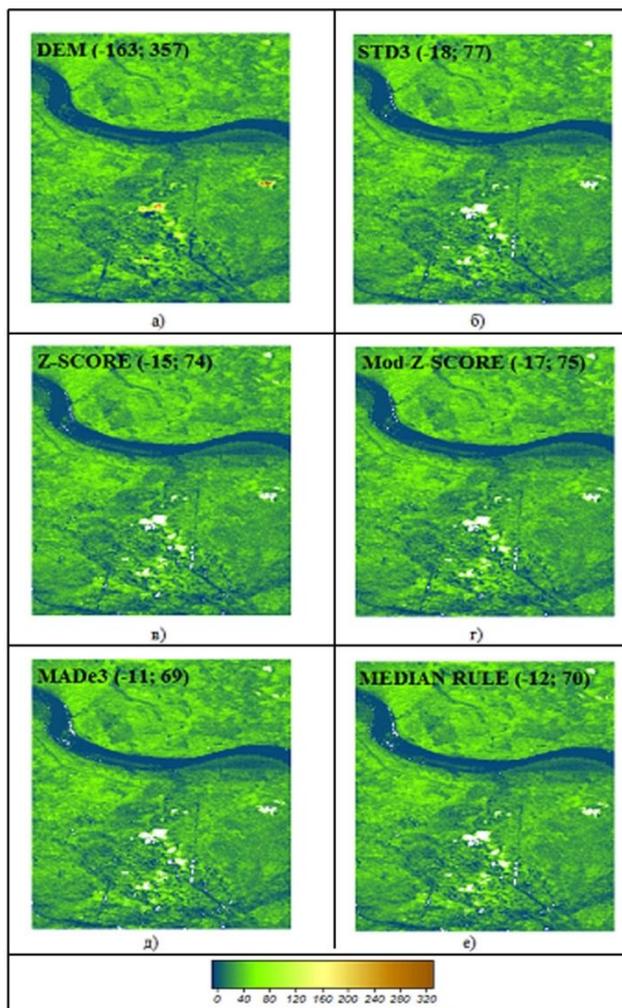


Рисунок 2.31. Пример применение неформальных тестов для выявления выбросов в высоте рельефа цифровой модели (Минеев и др., 2015, а, б):

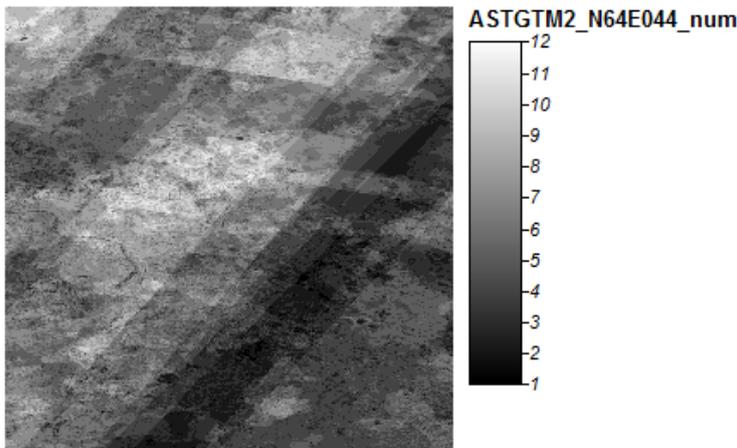
а) исходная модель; б) метод среднеквадратического отклонения; в) метод Z-Score; г) модифицированный метод Z-Score; д) метод абсолютного медианного отклонения; е) правило медианы.

В принципе для небольших участков выбросы можно удалить и в «ручном» режиме. Но учитывая занимаемую ими площадь на территории исследований ~ 7000 км² (табл. 2.11), необходимо применять автоматизированные методы, для чего и был, как указывалось ранее, написан сценарий на языке программирования Python, который позволяет рассчитывать вероятные диапазоны значений (и отбрасывать выбросы) по всем из пяти рассмотренных методов.

Последним этапом подготовки цифровой модели было устранение шероховатостей, шума и ошибок наложения снимков. Для устранения подобных ошибок был использован модуль DTM Filter. Работа модуля основывается на предположение о том, что большая разность высот между

двумя соседними ячейками вряд ли является крутым склоном, скорее ошибкой в данных. Вероятность того, что ячейка с большими значениями высот не является ошибочной, увеличивается пропорционально расстоянию между двумя рассматриваемыми ячейками, поэтому допустимая разность высот рассчитывается с помощью функции от этого расстояния. Рассматриваемая ячейка считается верной, если в пределах плавающего окна не встретится другая ячейка, разность высоты которой с высотой рассматриваемой ячейки не будет превышать допустимую разность (Vosselman, 2000).

Одним из показателей точности ЦМР ASTER GDEM является размер стэка, то есть количество стереопар, использованных для расчета значения высоты в конкретном пикселе. Размер стэка представлен в файле оценки



качества (QA-файл) для каждой сцены ASTER GDEM (рис. 2.32).

Рисунок 2.32. Размер стэка для сцены ASTER GDEM ASTGTM2_N64E044

Результат работы модуля DTM Filter представлены на рис. 2.33.

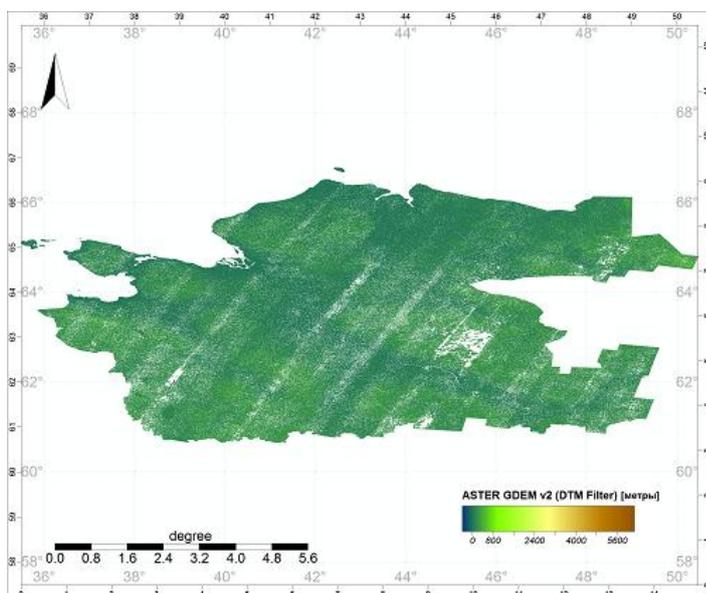


Рисунок 2.33. Результат работы модуля DTM Filter (удалены ошибочные данные ASTER GDEM v2 на границах областей с разным размером стэка и в тех областях, где размер стэка мал) (система координат: WGS84, проекция: WGS84 (EPSG:4326))

После выполнения всех процессов, связанных с устранением ошибок, образованные на месте неверных значений пустоты, были также заменены данными GMTED2010.

Фильтрации изображения применяются для улучшения его качества, снятия шума и выделения интересующих исследователя объектов. Широко применяются при анализе данных сглаживающие фильтры и фильтры, выявляющие на ЦМР перепады высот. Принцип действия этих фильтров представляет собой некоторое преобразование значений высот каждой точки ЦМР на основе информации о значениях ее соседей в какой-либо достаточно ограниченной окрестности. Как правило, изображение фильтруется матрицей определенного размера, коэффициенты которой могут быть заданы произвольно.

Сглаживающие фильтры (Average, Brown, Median, Lev, Nagao, Graham и др.) позволяют снять шум и получить однородные участки изображения, пригодные для дальнейшей обработки с целью выявления тех или иных структурно-вещественных комплексов. Фильтры, подчеркивающие перепады высот, используются при поиске на изображении границ между различными структурно-вещественными комплексами и при выявлении разрывных нарушений. К группе этих фильтров относятся Sobel, Sharp, Prewitt и др. (Баранов, 2001).

Для сглаживания цифровой модели рельефа в данном исследовании был применен фильтр, основанный на среднеквадратическом отклонении. Работа фильтра заключается в том, что вокруг каждой ячейки модели строится окно определенного размера и для полученного окна высчитывается среднеквадратическое отклонение. Далее всем ячейкам окна, значение которых превышает двойное среднеквадратическое отклонение (по модулю), задается новое значение, равное среднеквадратическому отклонению окна. В SAGA GIS такой фильтр реализован в модуле Simple Filter.

Модуль «Simple Filter» создает новый растровый слой путем пересчета значений в ячейках входного растрового слоя с помощью математической

формулы от значений в целевой ячейке и в окружающих ее ячейках. Расчеты проводятся плавающим окном заданного размера (рис.2.34, А).

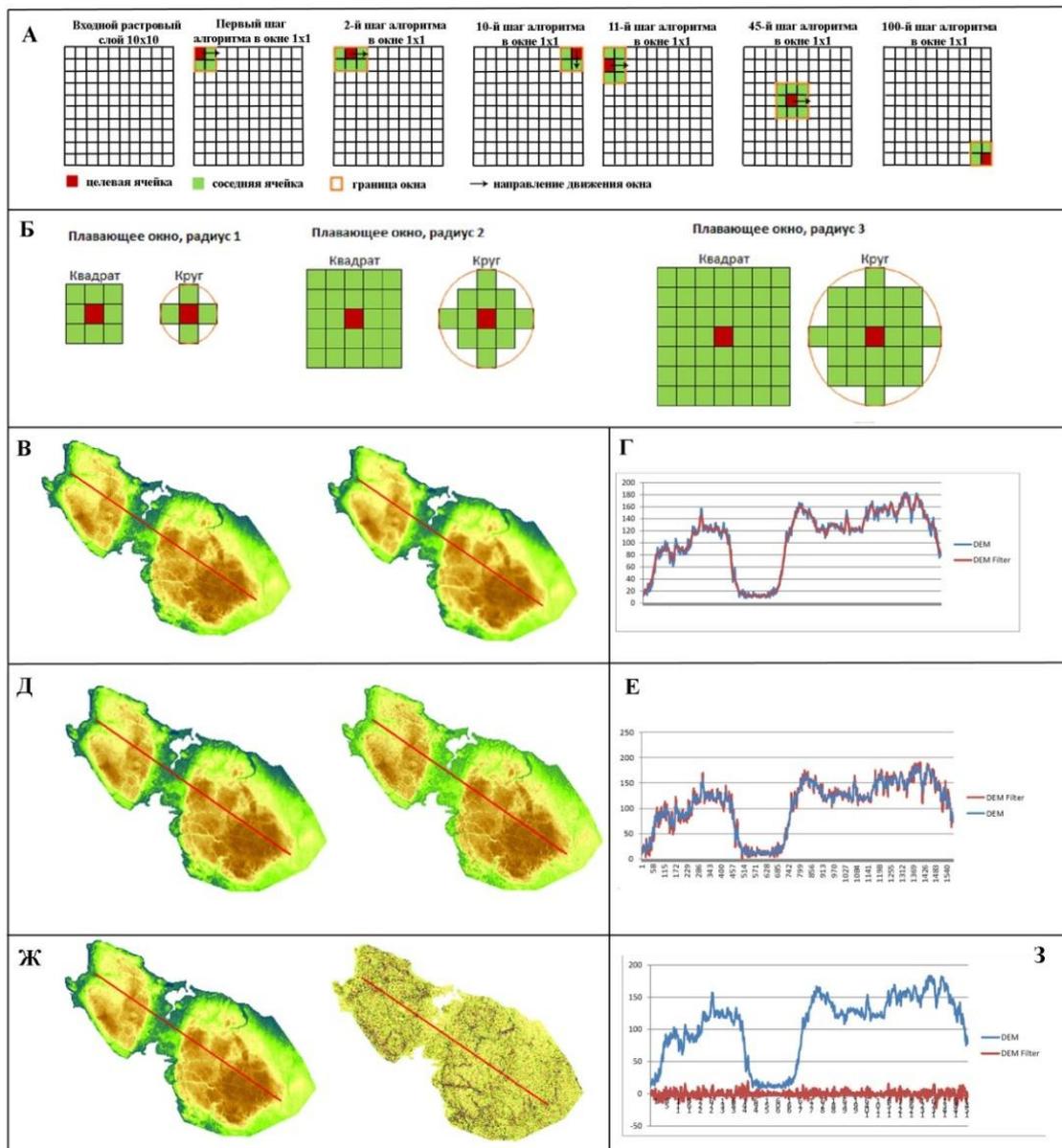


Рисунок 2.34. Примеры работы модуля Simple Filter с применением разных типов фильтров

А – алгоритм работы плавающего окна; Б – примеры «окон»; В – сглаживание (слева – исходный растр; справа – новый растр, рассчитанный модулем с применением типа фильтра Smooth; красным показана линия профиля); Г – график профиля (синим показаны исходные высоты; красным – после сглаживания); Д – применение фильтра Sharpen (слева – исходный растр; справа – новый растр, рассчитанный модулем Simple Filter с применением типа фильтра Sharpen; красным показана линия профиля); Е – график профиля (синим показаны исходные высоты; красным – после применения фильтра Sharpen); Ж – применение фильтра Edge (слева – исходный растр; справа – новый растр, рассчитанный модулем Simple Filter с применением типа фильтра Edge; красным показана линия профиля); З – график профиля (синим показаны исходные высоты; красным – после применения фильтра Edge)

В качестве опций модуль принимает три параметра – тип плавающего окна (Search Mode), тип фильтра (Filter), радиус плавающего окна (Radius).

Радиус плавающего окна задает количество участвующих в расчетах соседних ячеек. Тип плавающего окна задает его форму, это может быть круг (Circle) или квадрат (Square) (рис. 2.34, Б).

Тип фильтра определяет то, по какой формуле будут рассчитаны значения нового раstra. Есть три типа фильтров: сглаживание (Smooth), «заострение» (Sharpen) и «усиление кромок» (Edge) (http://sourceforge.net/p/saga-gis/wiki/grid_filter_0/). Если фильтр применяется к цифровой модели рельефа, то значениями ячеек будут высоты.

Сглаживание (Smooth) усредняет разницу между высотой ячейки и высотами окружающих ее ячеек. Новая высота ячейки рассчитывается по формуле:

$$z_c = avg(z_i)_n, \quad (2.8)$$

где $avg(z_i)$ – это средняя высота в плавающем окне.

Тестовое применение данного фильтра и сопоставление значений высоты до сглаживания и после по профилю приведены на рис. 2.38, В, Г, соответственно.

«Заострение» (Sharpen), является процедурой противоположной сглаживанию. Заострение выделяет, подчеркивает разницу между высотами ячеек. Новая высота рассчитывается по формуле:

$$z_c = 2z - avg(z_i) \quad (2.9)$$

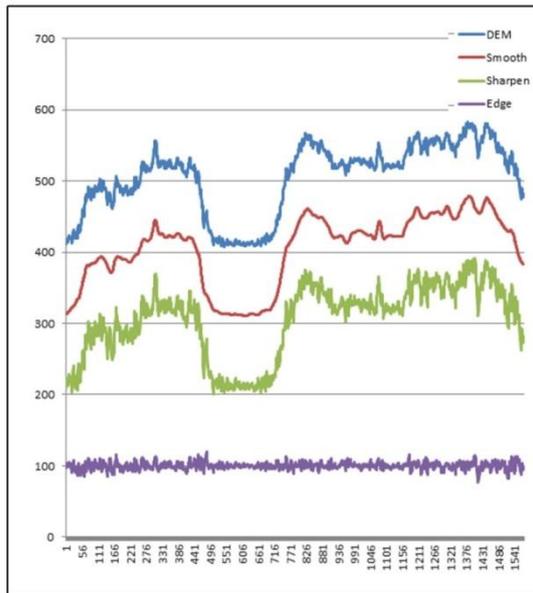
Тестовое применение данного фильтра и сопоставление значений высоты до сглаживания и после по профилю приведены на рис. 2.38, Д, Е, соответственно.

«Усиление кромок» (Edge) служит для определения в рельефе линий перегиба или участков с большой разностью высот. Новая высота рассчитывается по формуле:

$$z_c = z - avg(z_i) \quad (2.10)$$

Тестовое применение данного фильтра и сопоставление значений высоты до сглаживания и после по профилю приведены на рис. 2.34, Ж, З, соответственно.

В данном исследовании использовался сглаживающий фильтр Smooth из модуля Simple Filter, позволяющий снять шум и получить однородные участки изображения, пригодные для дальнейшей обработки с целью



выявления тех или иных структурно-вещественных комплексов. Сравнение различных фильтров из модуля Simple Filter (рис. 2.35) показало, что этот фильтр имеет наиболее «щадящий» характер.

Рисунок 2.35. Сопоставление различных фильтров из модуля Simple Filter

При расчетах параметров рельефа были использованы несколько выбранных размеров сетки. Для изначального размера сетки ASTER GDEM ~30 метров было выбрано окно размером 10×10 ячеек (~300×300 м), в остальных случаях модель сглаживалась окном 1×1 ячейку (рис. 2.36).

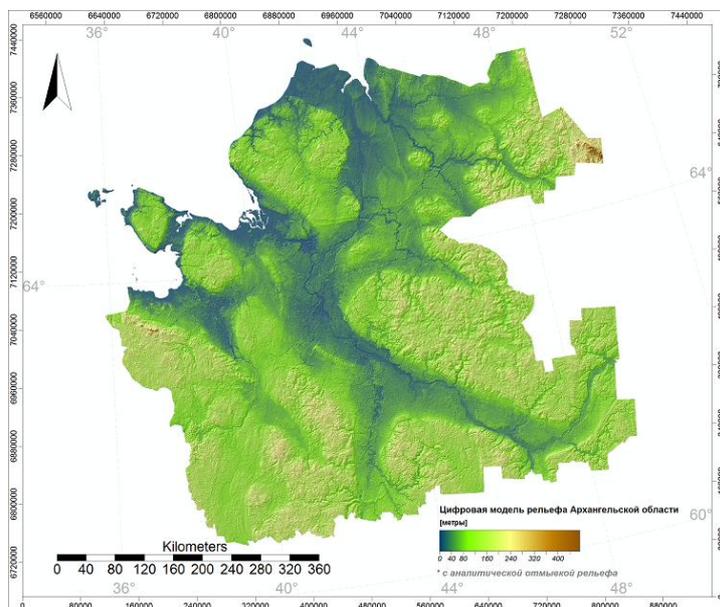


Рисунок 2.36. ЦМР Архангельской области (размер ячейки 480x480 м; система координат: Пулково 1995, проекция: Гаусса-Крюгера, Зона 6) (Минеев и др., 2015, а, б)

2.6 Заполнение впадин

На последнем этапе подготовки модели для расчета геоморфометрических параметров необходимо произвести ее гидрологическую коррекцию. В большинстве ЦМР содержится множество понижений рельефа, выраженных в виде площадей без стока и часто называемых впадинами (Zhu et al., 2013).

Определение и удаление поверхностных впадин – это важный этап подготовки ЦМР для дальнейшего гидрологического моделирования и анализа на ее основе. Впадиной называют локальный минимум, не имеющий стока вниз по склону ни к одной из смежных ячеек цифровой модели. Впадина может состоять из одной или из группы смежных ячеек с одинаковым значением высоты, которое меньше значения окружающих ячеек (Wang, Liu, 2006).

В качестве впадин могут выступать как элементы естественного рельефа, так и ложные артефакты. Ложные впадины – это недостатки ЦМР, наличие которых обусловлено ошибками входных данных, интерполяции в процессе генерации цифровой модели, округления интерполированных значений, усреднения значений высоты (Wang, Liu, 2006).

Существует достаточное количество автоматических методов устранения впадин из ЦМР. Одни методы основаны на простом последовательном увеличении значений высоты в ячейках впадины до тех пор, пока не станет возможным сток вниз по склону с тем ограничением, что сток не может вернуться обратно в ячейку впадины. Другие методы предлагают простое размывание значений цифровой модели рельефа для уменьшения количества и размера впадин (Garbrecht, Martz, 2000).

Традиционные методы, в основе которых в большинстве случаев лежит последовательное заполнение впадин со сравнением промежуточных результатов на каждой итерации, как правило, сложны в реализации и требуют больших затрат по времени исполнения. Особенно когда в цифровой модели высока доля случайного шума (Planchon, Darboux, 2002).

Эффективные методы устранения впадин разработаны L. Wang и H. Liu (2006) и O. Planchon и F. Darboux (2002). Метод Planchon и F. Darboux заключается в том, что вместо постепенного заполнения впадин, в первую очередь рельеф заполняется «толстым слоем воды», а затем удаляется избыток (Planchon, Darboux, 2002). Метод L. Wang и H. Liu (2006) способен за один «проход» одновременно определить как направления потоков, так и пространственное разделение водоразделов. В основе метода лежит понятие «высота заполнения» и алгоритм поиска направления потоков с наименьшими затратами (Wang, Liu, 2006). Оба этих метода реализованы в геоинформационной системе SAGA GIS в виде соответствующих модулей Fill Sinks (Planchon, Darboux, 2002) и Fill Sinks (Wang & Liu).

2.6.1 Метод заполнения впадин L. Wang и H. Liu

В работе авторов (Wang, Liu, 2006) подробно описываются детали, возможности реализации, а также концептуальные понятия, на которых основывается их алгоритм, что позволяет автору не рассматривать детально этот вопрос. Как было сказано выше в основе метода лежит новое понятие «высота заполнения». Высота заполнения определяет наименьшее значение высоты, на которое должна быть поднята ячейка впадины, чтобы сток из этой ячейки достиг выхода на границе цифровой модели. Если высота ячейки достаточна для обеспечения нисходящего потока к выходу на границе модели, то такая ячейка не нуждается в поднятии, и ее высота заполнения равна изначальному значению высоты. Если же значение высоты в ячейке не обеспечивает нисходящий поток, то такая ячейка должна быть поднята с ее первоначальной высоты на высоту заполнения. Удаление впадин из цифровой модели рельефа означает создание такой цифровой модели, в каждой ячейке которой обеспечивается нисходящий поток к выходу на границе модели. Нисходящий поток от внутренней ячейки состоит из последовательности ячеек, высота которых не увеличивается (уменьшается или остается неизменной) по направлению к границе модели. Так как

алгоритм подразумевает поиск потоков в направлении от границы модели к внутренним ячейкам (обратное направление), то данное выше условие эквивалентно следующему: высота в последовательности ячеек, образующих поток, не уменьшается (увеличивается или остается неизменной) по направлению от границы модели к внутренним ячейкам. Алгоритм работы метода (Wang, Liu, 2006) показан на рис. 2.37 (Минеев и др., 2015, а).

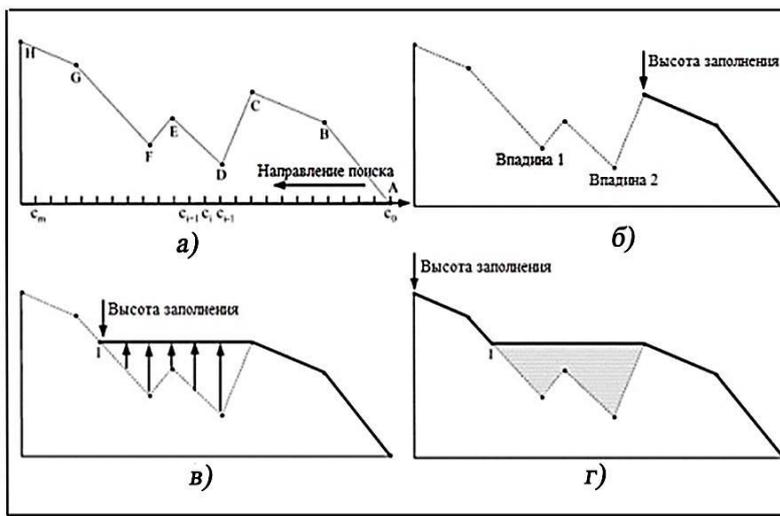


Рисунок 2.37. Работа метода L. Wang и H. Liu (2006): а) Профиль рельефа с выходом потока в точке А; б) высота заполнения в ячейках между точками А и С равна исходной высоте для каждой ячейки; в) высота заполнения между точками С и I равна исходной высоте точки С; г) высота заполнения в ячейках между точками I и H равна исходной высоте

На рисунке 2.37а ячейки профиля в направлении от выхода потока А к внутренней точки Н обозначены как c_0, c_1, \dots, c_m . Ячейка c_0 соответствует точки А. Высота заполнения $S(c_0)$ ячейки c_0 равна исходной высоте $E(c_0)$, так как ячейка c_0 – это выход потока на границе цифровой модели. Для каждой ячейки c_i высота заполнения $S(c_i)$ должна быть выше или равняться высоте заполнения $S(c_{i-1})$ ее соседней ячейки c_{i-1} . Если исходная высота $E(c_i)$ ячейки c_i выше, чем высота заполнения $S(c_{i-1})$ соседней ячейки c_{i-1} , то за высоту заполнения $S(c_i)$ ячейки c_i принимается ее исходная высота $E(c_i)$. Иначе за высоту заполнения $S(c_i)$ принимается высота заполнения $S(c_{i-1})$ соседней ячейки c_{i-1} .

Распространяя, таким образом, высоту заполнения, можно убрать все впадины на пути от точки А к внутренней ячейки c_i . Этот путь определяется последовательностью высот заполнения $S(c_0), S(c_1), \dots, S(c_i)$, и такая

последовательность гарантированно неубывающая. Высоту заполнения $S(c_i)$ внутренней ячейки c_i можно рассматривать как наивысшую высоту из всех ячеек, расположенных на нисходящем потоке из ячейки c_i к выходу на границе модели.

Рисунок 2.37 иллюстрирует процесс работы алгоритма на одномерном профиле, в котором предполагается, что выход на границе модели и направление поиска впадин известны, а также известна последовательность соединенных ячеек, составляющих поток. В двумерных ЦМР такие параметры явно не определены. Поэтому перед применением схемы распространения высоты заполнения, необходимо определить правильное направление поиска и потоков в двумерной ЦМР.

В работе (Wang, Liu, 2006) предложен алгоритм поиска направления потоков с наименьшими затратами. Алгоритм поиска постепенно связывает все выходы на границе модели с внутренними ячейками по направлению вверх от границы модели. Путь поиска к конкретной внутренней ячейке состоит из последовательности ячеек, в которой каждая последующая ячейка соединена с предыдущей. Так как в двумерных ЦМР из ячейки есть восемь потенциальных направлений потока, то можно определить множество возможных путей соединения выхода на границе с конкретной внутренней ячейкой. Выбор конкретного пути из множества возможных определяет результирующую высоту заполнения в этой ячейке. Поскольку для разных путей высота заполнения может быть различна, оптимальным считается тот путь, при котором высота заполнения в рассматриваемой ячейке минимальна. Оптимальный путь можно рассматривать как путь с наименьшими затратами в том смысле, что будет затрачено наименьшее количество воды для заполнения впадин.

Таким образом, цель алгоритма поиска потоков с наименьшими затратами может быть сформулирована так: получить множество выходов на границе цифровой модели рельефа и найти от данных выходов к каждой

внутренней ячейке модели оптимальные пути, при которых результирующая высота заполнения в каждой ячейке будет минимальна. В теории графов оптимальные пути, связывающие один выход на границе модели с внутренними ячейками модели, называются деревом. Выход потока на границе модели – это начальная вершина дерева, направленные связи между двумя смежными ячейками (вершинами дерева) – это ребра дерева.

Основная идея поиска с наименьшими затратами (или поиска по первому наилучшему совпадению) заключается в том, чтобы в текущей ячейке последовательности, составляющей поток, из всех возможных направлений распространения потока назначить наивысший приоритет направлению с наименьшими затратами. Так как цель алгоритма найти поток с минимальной высотой заполнения, то затратами является высота заполнения. Ячейки на границы модели рассматриваются как потенциальные выходы, их высота заполнения приравнивается к их исходной высоте и определяется как стоимость выхода.

$$h(b_k) = S(b_k) = E(b_k), \quad (2.11)$$

где $H(b_k)$ – это оценка затрат на то, что граничная ячейка b_k будет включена в оптимальный поток как выход, $S(b_k)$ – высота заполнения граничной ячейки b_k , $E(b_k)$ – исходная высота граничной ячейки b_k .

Среди всех потенциальных выходов наивысший приоритет отдается тем, у которых наименьшая высота, и эти выходы рассматриваются как начальные вершины древ оптимальных потоков. Связи (направления) между начальной вершиной и ее смежными ячейками рассматриваются как первая генерация ребер дерева, сами смежные ячейки помечаются как вершины дерева для последующих генераций, а начальная вершина помечается как обработанная вершина (та вершина, которая включена в оптимальный поток). Функция оценки смежных ячеек для включения в оптимальный поток выглядит следующим образом:

$$h(n_j) = S(n_j) = \max\{E(n_j), S(c)\}, j = 1, 2, \dots, 7, \quad (2.12)$$

где n_j – j -ая смежная ячейка центральной ячейки c (обработанной вершины), $h(n_j)$ – оценка включения смежной ячейки n_j в оптимальный поток, $S(n_j)$ – высота заполнения ячейки n_j , $E(n_j)$ – исходная высота ячейки n_j , $S(c)$ – высота заполнения центральной ячейки c .

Так как при нисходящем потоке вода не может течь в обратном направлении, то для конкретной центральной ячейки рассматривается семь потенциальных смежных ячеек, в которые может распространиться поток.

Если в ходе распространения древа потока из наименьшего выхода оказывается, что один из потенциальных выходов имеет меньшую значимость, чем все смежные ячейки обрабатываемой в данный момент центральной, то этот потенциальный выход помечается как начальная вершина второго древа, и из этой вершины таким же образом генерируется поток.

Алгоритм завершается, когда в процессе генерации древ были рассмотрены все ячейки цифровой модели рельефа, то есть для каждой ячейки была вычислена высота заполнения.

Для заполнения впадин в цифровой модели рельефа Архангельской области был использован метод L. Wang и H. Liu, реализованный в SAGA GIS. На рис. 2.38 показан участок цифровой модели рельефа с аналитической отмывкой и результатом работы модуля (Минеев и др., 2015, а).

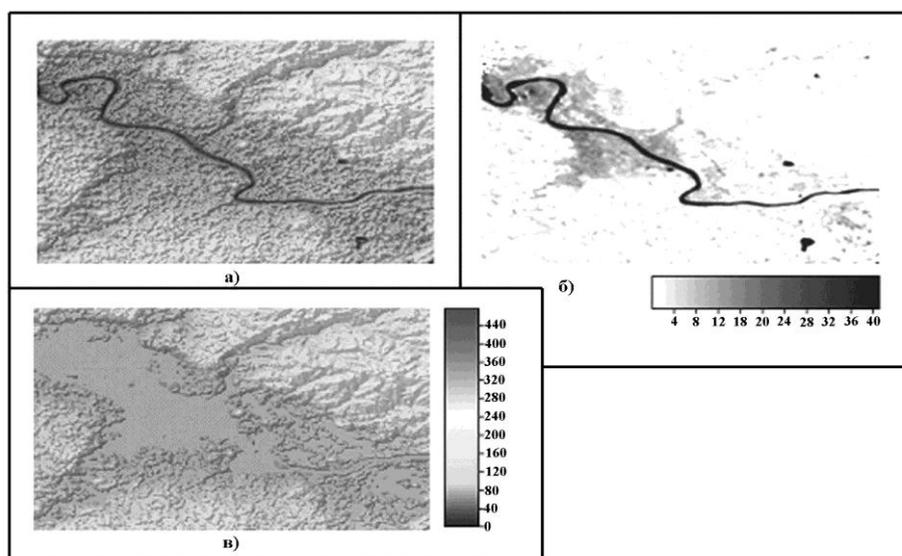


Рисунок 2.38. Заполнение впадин: а) рельеф; б) высота заполнения; в) рельеф с заполненными впадинами

Как указывалось ранее, этот метод заполнения впадин реализован в геоинформационной системе SAGA GIS в виде модуля Fill Sinks. Однако проверка работы модуля на конкретной территории показала, что он хорошо работает с материалами в проекции WGS84 и практически не работает в проекции Гаусса-Крюгера. Поэтому был применен аналогичный модуль Sink Removal, как более пригодный для работы в вышеуказанной проекции. Тестовые вычисления были проведены для территории Онежского полуострова (рис. 2.39). Онежский полуостров был выделен как тестовый участок по следующим причинам (Кутинов, Чистова, 2004): относительно небольшая замкнутая площадь при достаточно хорошо выраженном рельефе; наличие протерозойских и палеозойских отложений, а также тектонических структур (рифейский Онежский грабен и вендский Унский грабен), выраженных в рельефе; наличие водораздела.

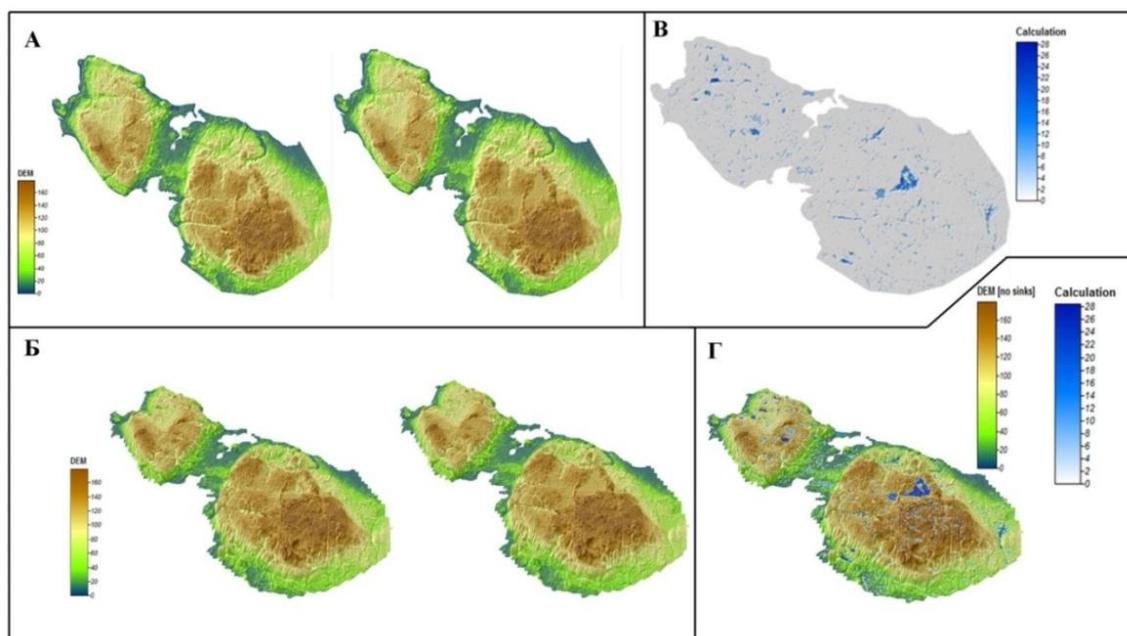


Рисунок 2.39. Примеры работы модуля Sink Removal:

А – результат работы модуля Sink Removal (слева – исходная ЦМР, справа – ЦМР без впадин); Б – результат работы модуля Sink Removal в 3D (слева – исходная ЦМР, справа – ЦМР без впадин); В – заполненные впадины; Г – ЦМР без впадин, вид в 3D (выделены области заполнения впадин)

На основе подготовленной ЦМР производился выбор и расчет параметров для геоэкологического районирования территории.

В целом алгоритм подготовки цифровой модели рельефа и выбора параметров отражен на рисунках 2.40.

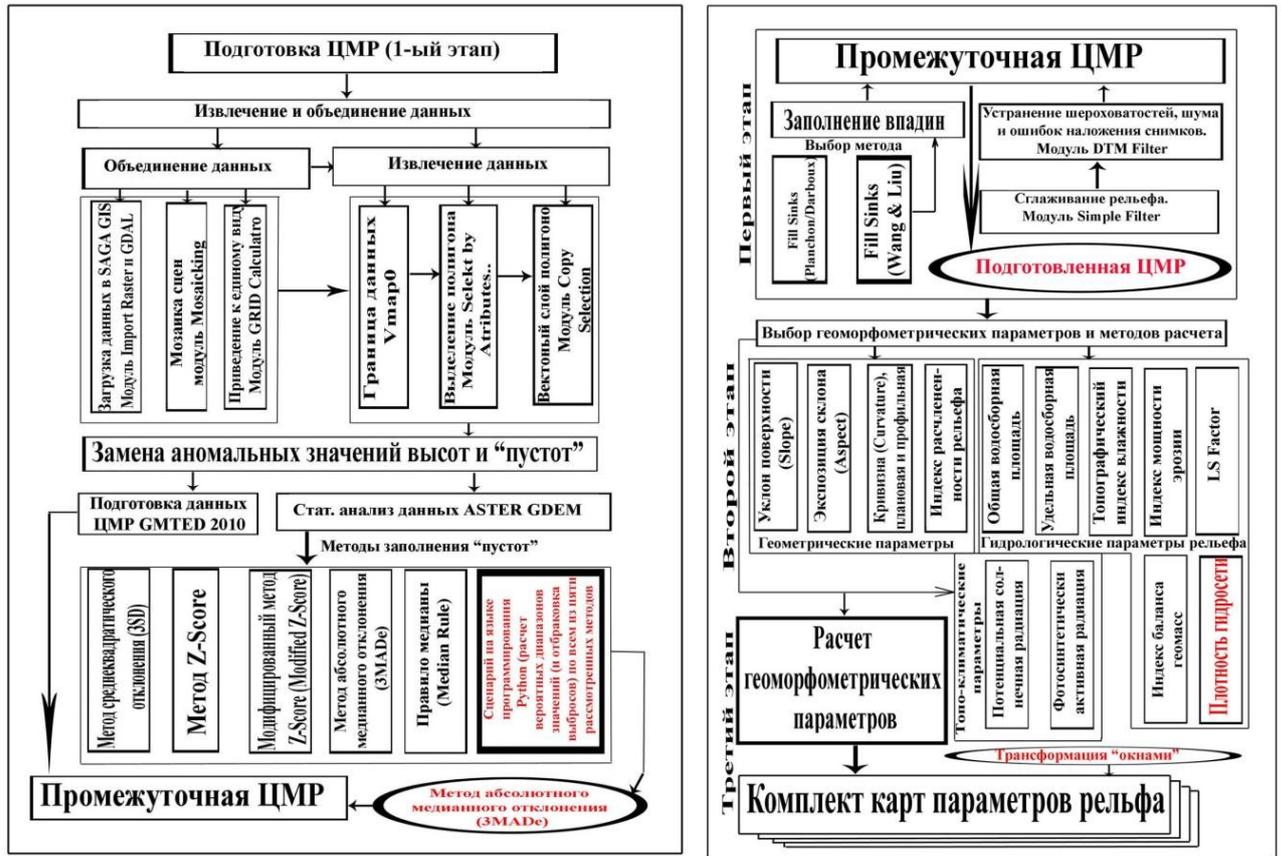


Рисунок 2.40. Алгоритм методики подготовки корректной цифровой модели рельефа (ЦМР) на основе ЦМР ASTER GDEMv2 с использованием программного обеспечения ГИС SAGA для расчета геоморфометрических параметров и создания комплекта карт состояния окружающей среды, по (Минеев и др., 2015, б)

Цветом выделены авторские сценарии: выбора метода выделения участков с аномальными высотами и расчета плотности гидросети

2.7 Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований

Для дальнейшего расчета геоморфометрических параметров была проведена оценка точности подготовленной цифровой модели. В работе (Dawod, Al-Ghamdi, 2017) отмечается, что надежность любой ЦМР должна быть проверена сопоставлением с известными наземными контрольными точками с измеренными точными координатами и точными значениями высот. Как указывалось ранее, территория Архангельской области покрыта практически сплошным растительным покровом (лесистость области

составляет 77,7 %), характеризуется крайне низкой заселённостью и отсутствием высотных построек в городах и населённых пунктах. Средняя высота лесного покрова составляет 10-12 м, что соответствует точности исходной модели по высоте. Таким образом, в данном случае можно не вводить в расчёты поправки на влияние растительности и городские строения, не теряя качества полученной модели.

Обычно оценка надежности (точности) ЦМР проводится либо сопоставлением с известной ЦМР на данный регион, либо с топокартами, либо с данными GPS. Каждый из перечисленных методов имеет определенные недостатки, о чем будет сказано далее.

Для проверки точности построенной ЦМР Архангельской области было проведено сопоставление с открытыми векторными данными ГИС Панорама, полученными оцифровкой топокарт м-ба 1:50000; с ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с топографических карт м-ба 1:200000 в ПО ГИС GRASS (Гофаров и др., 2006); а также с проведенными полевыми замерами высот с помощью GPS-навигатора (Garmin Oregon 450, точность позиционирования 3 м) на территории возвышенности (Шуйгоры) Ветренного кряжа (Минеев и др., 2018).

Данные ГИС «Панорама» на Архангельскую область включают в себя около 770 векторных слоёв (каждый из которых соответствует номенклатурному листу топокарты), распространяются в формате SXF. Программное обеспечение SAGA GIS не позволяет напрямую считывать данные формата SXF, поэтому для конвертации данных ГИС «Панорама» в формат SHAPE была применена ГИС QuantumGIS. В результате были получены векторные слои формата SHAPE, содержащие точечные объекты с координатами и значениями высот.

В качестве геодезической основы в плановом отношении выступали пункты государственной геодезической сети (точность 0,1 мм), в высотном отношении – пункты государственной нивелирной сети (точность 0,8 мм). Полученные слои были импортированы и «сшиты» средствами ПО SAGA

GIS. Всего было извлечено 69048 точечных объектов, из которых 62548 объектов располагается в пределах Архангельской области.

На рис. 2.41 показано распределение точечных объектов, извлечённых из ГИС «Панорама» в пределах Архангельской области. На их основе произведён подсчёт разности значений высот между отметками с оцифрованных топокарт ГИС «Панорама» и данными ЦМР Архангельской области (табл. 2.12).

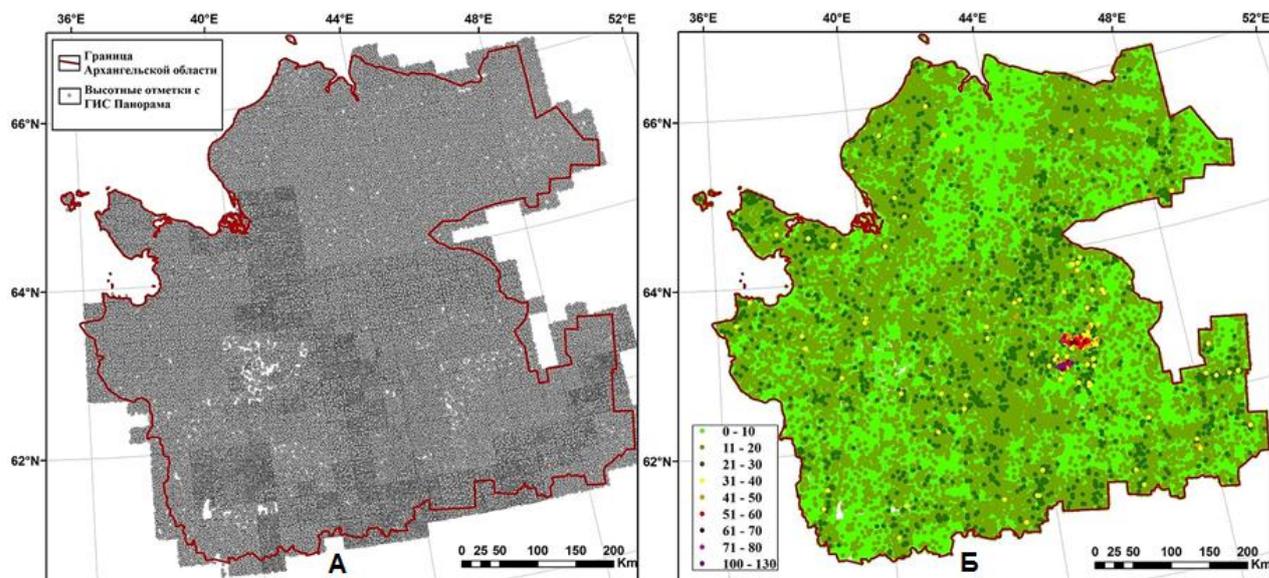


Рисунок 2.41. Разности значений высот между высотными отметками, извлеченными из ГИС Панорама (А) и данными ЦМР Архангельской области (Б), по (Минеев и др., 2018)

Таблица 2.12 Абсолютные разности значений высот между данными с ГИС «Панорама» и ЦМР Архангельской области (Минеев и др., 2018)

Абсолютная разность по высоте, м	Количество высотных отметок	Доля, %
0 – 10	46541	74.4085
11 – 20	14615	23.3661
21 – 30	1226	1.9601
31 – 40	101	0.1615
41 – 50	33	0.0528
51 – 60	19	0.0304
61 – 70	6	0.0096
71 – 80	3	0.0048
100 – 130	4	0.0064
Среднее арифметическое разности		7.45 м
Стандартное отклонение		5.62 м
Максимальная разность		126.71 м (1 высотная отметка)
Минимальная разность		0 м

Из табл. 2.12 видно, что абсолютная разность большинства высотных отметок (74 %) не превышает 10 м, 24 % отметок укладываются в интервале от 11 до 20 м и лишь 2 % значений имеют расхождение свыше 20 м. Эти остаточные значения приходятся на территорию, где в исходном виде отсутствовали данные ASTER GDEM v.2 и пустоты заполнялись данными GMTED2010 (рис. 2.33).

Далее проводилось сопоставление полученной модели с ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200 000 в ПО GRASS GIS и применением интерполирования сплайн-функцией (Гофаров и др., 2006). Вначале была выполнена процедура сглаживания контуров различными окнами фильтрации – 480×480 м (15 угл. с, ~500×500 м), 960×960 м (30 угл. с,

~1000×1000 м), поскольку исходная модель (30×30 м) характеризуется доминированием локальной составляющей, что затрудняет её сопоставление с другими моделями (рис. 2.42).

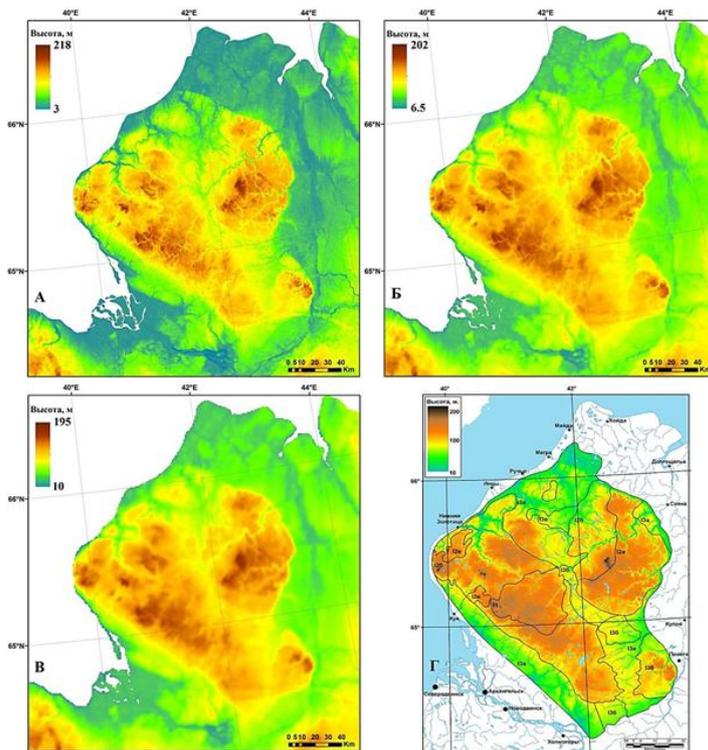
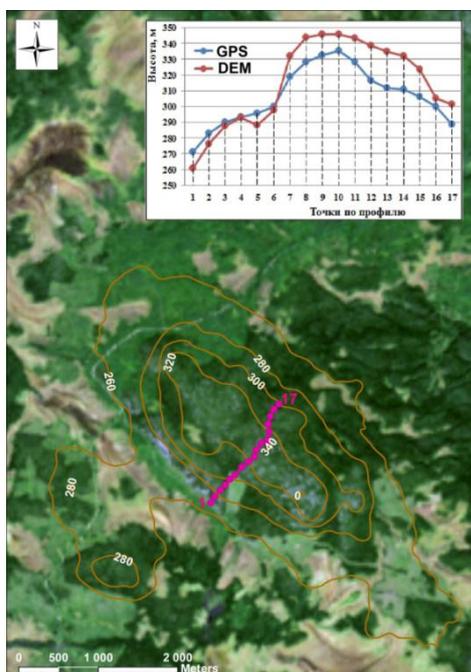


Рисунок 2.42. Сопоставление построенной ЦМР с моделью рельефа Беломорско-Кулойского плато по работе (Минеев и др., 2015, а): а – 30×30 м (исходная модель); б – 480×480 м; в – 960×960 м; г – модель рельефа БКП (20×20 м) (Гофаров и др., 2006)

Сопоставление моделей показало, что, несмотря на снижение значений высот с увеличением окна осреднения, подготовленная ЦМР является более точной, чем модель, созданная на основе топокарт. Это связано с тем, что для устранения артефактов в модели Беломорско-Кулойского плато была проведена процедура сглаживания сплайн-функцией (Гофаров и др., 2006), в

то время как трансформации окнами являются более «щадящей» процедурой, сохраняя детальные особенности рельефа.

На последнем этапе верификации построенной модели были проведены



полевые замеры высот с помощью GPS-навигатора на территории возвышенности (Шуйгоры) Ветреного кряжа. Результаты приведены на рис. 2.43 (в качестве «подложки» использовался снимок Landsat-8 от 19.08.2017) и в табл. 2.13.

Рисунок 2.43. Полевые замеры и разница высот (график) по GPS-навигатору и построенной ЦМР (Минеев и др., 2018)

Таблица 2.13 Данные GPS-замеров и значений высот построенной ЦМР

Точки по профилю	Значения высот, м		Абсолютная разница значений
	GPS	DEM	
1	271.23	260.57	10.66
2	282.77	276.25	6.52
3	289.97	287.64	2.33
4	293.34	293.07	0.27
5	295.74	288.17	7.57
6	300.07	297.75	2.32
7	318.81	332.22	13.41
8	328.43	344.17	15.74
9	332.75	345.95	13.20
10	335.64	346.00	10.36
11	328.43	343.49	15.06
12	316.41	338.64	22.23
13	311.60	335.18	23.58
14	310.64	331.94	21.30
15	306.32	323.65	17.33
16	300.07	305.19	5.12
17	288.53	301.34	12.81
Минимальное значение абсолютной разницы			0.27
Максимальное значение абсолютной разницы			23.58
Среднее значение абсолютной разницы			11.75

В результате можно сделать следующие выводы:

1) при сопоставлении высот построенной модели с открытыми векторными данными ГИС Панорама выявлено, что лишь 2 % значений имеют расхождение свыше 20 м. Это остаточные значения, приходящиеся на территорию, где в исходном виде отсутствовали данные ASTER GDEM v.2, а пустоты заполнялись данными GMTED2010, имеющей гораздо более низкое разрешение;

2) сопоставление с ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топокарт показало, что построенная модель является более точной, поскольку метод трансформации окнами является более «щадящей» процедурой, нежели применение сглаживания сплайн-функцией;

3) сравнение высот по GPS-навигатору также показало, что разницы в значениях укладываются в диапазон от 0 до 20 м, что соотносится с разрешением исходной модели (30 м).

Таким образом, можно утверждать, что построенная ЦМР Архангельской области является точной (надежной) и пригодной для проведения на ее основе дальнейшего геоморфометрического анализа с целью получения геоэкологически значимой информации.

Возвращаясь к недостаткам применяемых методов анализа, следует отметить следующее:

- сопоставление с другой ЦМР требует оценки и ее точности, что весьма затруднительно;

- оценка по топокартам, в т.ч. и созданным с использованием ГИС-технологий, требует знания методов интерполяции данных и вносимого ими искажающего эффекта;

- использование полевых замеров высот с помощью GPS-навигатора имеет локальный характер.

Поэтому для проверки полученных результатов диссертантом использовались данные геодезических пунктов. Оценка точности по высоте

при сопоставлении с геодезическими пунктами показана на рис. 2.44 и в табл. 2.14.

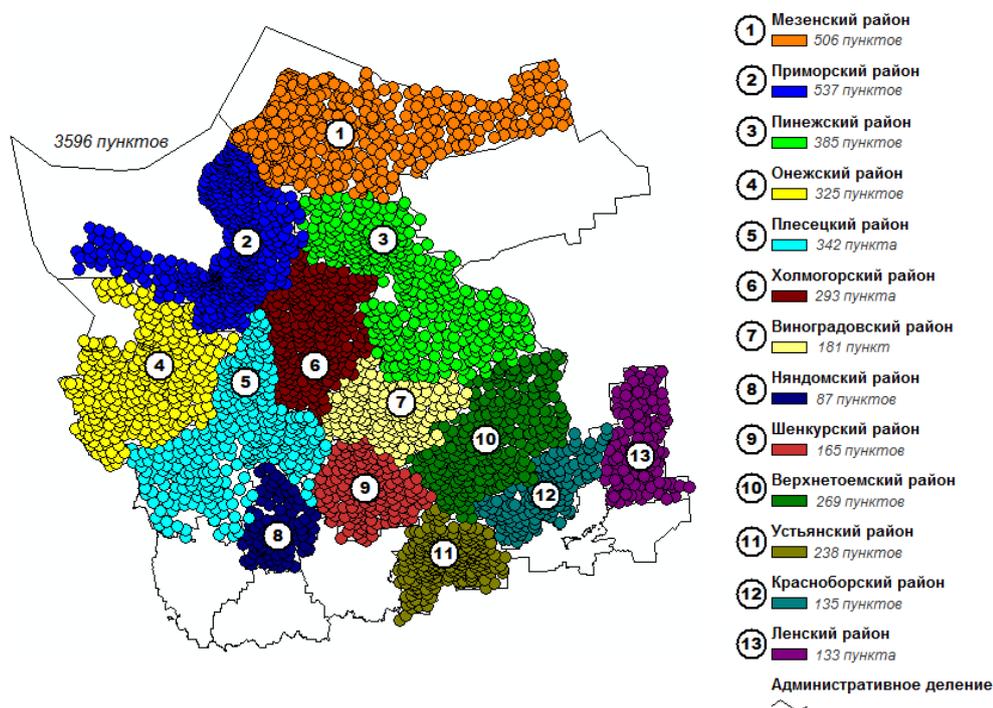


Рисунок 2.44. Геодезические пункты, используемые для проверки ЦМР

Таблица 2.14 Разность в измерениях высоты (по кластерам)

Кластер	Мин. значение, м	Макс. значение, м	Среднее значение, м	Стандартное отклонение, м	Доля от площади АО, %	Площадь км ²
1	0	6	4	0,96	23,12	95526
2	6	9	7	0,78	28,74	118723
3	9	12	10	0,93	20,42	84367
4	12	18	14	1,48	8,64	35693
5	18	44	22	4,97	1,11	4608

Всего исследовано 338918 км² (82% территории области).

Таким образом, впервые созданная цифровая модель рельефа Архангельской области, соответствующая геологическому строению и геоморфологии региона, является количественной основой для геоэкологического районирования (первое защищаемое положение).

ГЛАВА 3 ВЫБОР ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА И МЕТОДИК ИХ РАСЧЕТА

В настоящее время в геоинформатике сформировано научное направление, занимающееся цифровым анализом рельефа с целью получения практически значимой информации – геоморфометрия (англ. geomorphometry, digital terrain analysis) (Geomorphometry..., 2009; Wilson, Gallant, 2000).

Основным понятием в геоморфометрии является понятие морфометрической величины (МВ), то есть числовой характеристики рельефа, определенной в каждой точке карты (Шарый, 2006).

В основе геоморфометрии лежит анализ цифровой поверхности рельефа методами дифференциальной геометрии и логическими процедурами. Дифференциальная геометрия лежит в основе теории топографической поверхности и применяется для расчета локальных МВ (кривизны земной поверхности, крутизна и экспозиция). Расчет нелокальных МВ (водосборная площадь, топографический индекс и некоторые другие) основан на логических процедурах.

В спектре решаемых задач с использованием ЦМР можно выделить основные: изучение и количественная оценка современного состояния природной среды; территориальное планирование (городское, ландшафтное и др.); моделирование экологических ситуаций; прогнозирование ландшафтных процессов и др.

3.1 Геоморфометрия

Существует несколько классификаций морфометрических параметров, наиболее признанной из которых является классификация Шарого А.П. (Шарый, 2006, Shary, 2008, Shary et al., 2002). Диссертант в данном исследовании остановился на классификации, приведенной в работе (Глотов, 2013), прекрасно понимая дискуссионность этого решения. Но, на наш

взгляд, эта классификация больше соответствует структуре используемого в данном исследовании ПО SAGA GIS. В целом можно выделить несколько категорий морфометрических параметров (Готов, 2013): геометрические – описывают морфологические особенности территории, определяющие скорость и интенсивность потоков вещества и энергии, динамику склоновых процессов; гидрологические – используются для оценки поверхностного стока, степени увлажнения почвы и перемещения обломочного материала; топографо-микrokлиматические – данная группа показателей характеризует влияние земной поверхности на особенности распределения солнечной радиации, температурного поля и воздействия ветра; параметры вертикальной дифференциации природной среды.

Использование цифрового моделирования рельефа дает возможность создания тематических карт важнейших геоморфометрических параметров и на их основе карт потенциальной эрозионной опасности, направлений поверхностного стока, геохимической миграции, элементов устойчивости ландшафтов, преобладающий режим (аккумуляционный, эрозионный) и т.п. (Хромых, Хромых, 2007).

В зарубежных источниках уже порядка трех десятилетий публикуются работы, посвященные вопросам получения качественной и количественной информации для анализа различных процессов на основе цифровых моделей рельефа (Jenson, Domingue, 1988; Skidmore, 1989, 2007; Krcho, 1991; Moore et al., 1991; Richards, 1991; Zhang, Montgomery, 1994; Pike, 1995; Wood, 1996; Wilson, Gallant, 2000; Thompson et al., 2001; Mark, Smith, 2004; Li et al., 2005; Demoulin et al., 2007; Ehsani, 2008; Siart, 2009; Jacobsen, Passini, 2010; Straumann, 2010 и др.).

Среди российских авторов можно отметить работы, признанные в международном геоморфометрическом сообществе (Шарый, 2006, 2016; Shary, 2008; Флоринский, 2009, 2010; Florinsky, 2009, 2012).

Следует отметить, что количество российских исследований, посвященных изучению динамики и развитию рельефобразующих процессов,

в т.ч. эрозионных с использованием ЦМР в высоких широтах – незначительно. Это работы посвящены, в первую очередь, экзогенному рельефообразованию и эрозионным процессам в криолитозоне (Суходровский, 1979, Познанин, 2012 и др.). Изучение рельефообразующих процессов в лесных сообществах связано, в основном, с хозяйственным освоением территорий и лишь небольшое количество работ посвящено проявлению эрозионных процессов в естественных (не затронутых антропогенной деятельностью) северотаежных ландшафтах (Воскресенский, 1999, Евсеева, 2006 и др.). Учитывая площадь лесного покрова исследуемого региона, вопрос этот имеет приоритетное значение.

Учитывая достаточно большое количество и многообразие используемых геоморфометрических параметров, одной из задач данного исследования был выбор параметров и методик их расчета для геоэкологического анализа.

Процедура выбора оптимальных и/или достаточных для геоэкологического районирования геоморфометрических параметров проводилась в следующей последовательности:

- теоретический анализ значимости и применимости геоморфометрических параметров;
- расчет параметров на основе имитационной модели;
- расчет параметров на репрезентативных участках (Онежский полуостров и Беломорско-Кулойского плато) для оценки «достаточности» регистрируемого эффекта;
- расчет параметров по всей исследуемой территории для выбора методов генерализации.

В целом алгоритм подготовки ЦМР и выбора параметров отражен на рисунках 2.40-2.41.

Рассмотрим процедуру выбора геоморфометрических параметров и методы их расчета более подробно.

3.1.1 Геометрические параметры рельефа

Дифференциальная геометрия лежит в основе теории топографической поверхности и применяется для расчета локальных МВ (кривизны земной поверхности, крутизна и экспозиция). Расчет нелокальных МВ (водосборная площадь, топографический индекс и некоторые другие) основан на логических процедурах.

В основе аппроксимации земной поверхности лежит алгоритм Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (1987), согласно формуле 3.1 и рис. 3.1:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (3.1)$$

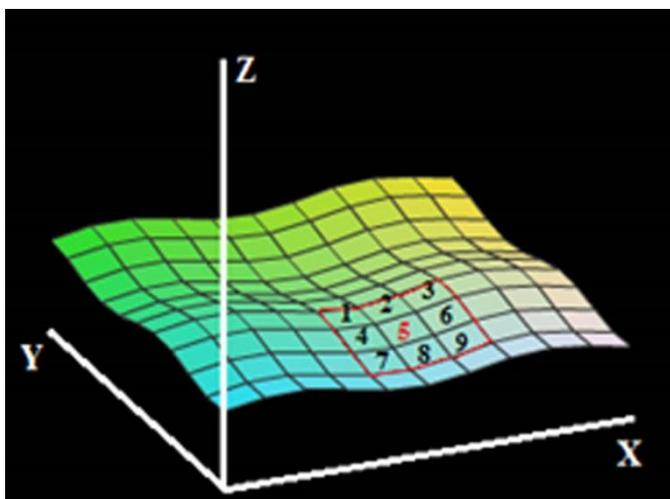


Рисунок 3.1. Аппроксимация земной поверхности (Zevenbergen, Thorne, 1987)

Модель Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (1987) определяет зависимость высоты z от координат x, y . Эта функция позволяет вычислять высоту точки, зная ее координаты, с помощью математических операций. Но для этого необходимо знать, чему равны 9 коэффициентов из формулы 3.1 ($A, B, C, D, E, F, G, H, I$). Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (1987) предлагают получать их из наблюдений (карт и цифровых моделей). Геоморфометрические параметры (угол наклона, экспозиция, кривизна) рассчитываются дифференцированием функции аппроксимации земной поверхности (3.1).

В этом случае в точке 5 (центральная точка матрицы 3×3) значения коэффициентов аппроксимации будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
A &= [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/2 + Z_5]/L^4 \\
B &= [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)/4 - (Z_2 - Z_8)/2]/L^3 \\
C &= [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)/4 + (Z_4 - Z_6)/2]/L^3 \\
D &= [(Z_4 + Z_6)/2 - Z_5]/L^2 \\
E &= [(Z_2 + Z_8)/2 - Z_5]/L^2 \\
F &= (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)/4L^2 \\
G &= (-Z_4 + Z_6)/2L \\
H &= (Z_2 - Z_8)/2L \\
I &= Z_5
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Расчёт параметров сводится к решению уравнений от коэффициентов аппроксимации (A, B, \dots, I). Так как при расчётах с использованием ЦМР значения высоты (Z_1, Z_2, \dots, Z_9) во всех точках матрицы 3×3 всегда известны, то уравнение определенного геоморфометрического параметра решается подстановкой выражений (3.2). В выражениях (3.2) L – это сторона ячейки.

Любую поверхность (в том числе рельеф) можно представить в виде функции от двух переменных:

$$Z = f(x, y) \tag{3.3}$$

Для оценки вычисляемых параметров была создана упрощенная модель рельефа (рис. 3.2) с использованием функции (3.4).

$$Z = \frac{\sin(x) * \cos(y)}{5} \tag{3.4}$$

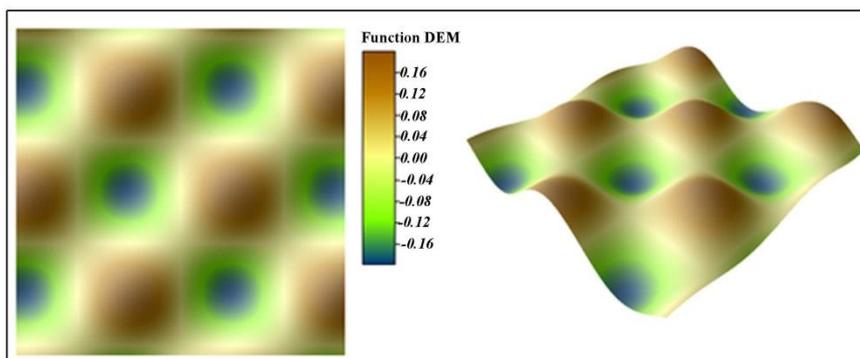


Рисунок 3.2. ЦМР, на основе которой далее рассчитывались значения параметров.

Немаловажное значение для расчета геоморфометрических параметров рельефа имеет понятие градиента поля. Если рассматривать цифровую модель рельефа как скалярное поле, то градиент – это векторное поле, векторы которого указывают в том направлении, в котором наблюдается максимальное изменение скалярной величины (высоты). Т.е., ЦМР – это

сетка высот (скалярных значений, чисел). Градиент – это сетка такой же размерности, но сетка не высот, а векторов, каждый вектор имеет длину и направление (рис. 3.3). Как производная поверхности первого порядка, градиент характеризуется величиной (уклоном) и направлением (экспозицией), т.е., длина вектора соответствует углу наклона, а направление экспозиции.

Вектор указывает в том направлении, где наблюдается максимальное изменение высоты, длина вектора показывает, насколько большое наблюдается изменение (рис. 3.3). Чем длиннее вектор, тем больше разница высот в его направлении.

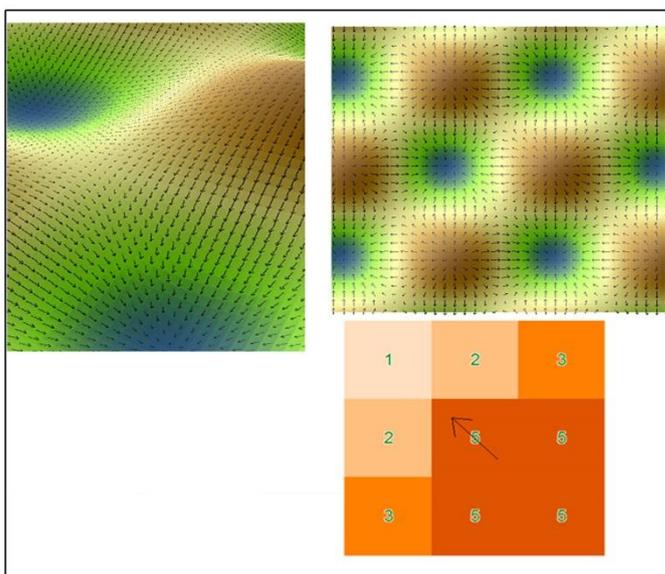


Рисунок 3.3. Пример векторного поля

Формула градиента выглядит следующим образом:

$$\nabla \bar{z} = \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right) \quad (3.5)$$

3.2 Выбор геоморфометрических параметров для геоэкологического районирования территории

Теоретический анализ геоморфометрических параметров показал, что характеристики эрозионных процессов наиболее полно отражают следующие величины: геометрические (величина уклона, экспозиция склона, кривизна (плановая и профильная) земной поверхности, индекс расчлененности рельефа; гидрологические (общая и удельная водосборные площади),

топографический индекс влажности, индекс мощности эрозии, индекс потенциала плоскостной эрозии (LS Factor), индекс баланса геомасс; опосредованно – топо-климатические: (потенциальная солнечная радиация, фотосинтетически активная радиация). Учитывая особенности строения территории, ряд параметров, например, таких, как баланс геомасс, характеризуют локальные процессы, слабо проявленные на исследуемой территории либо косвенно влияют на геологическую среду (экспозиция, потенциальная солнечная радиация, фотосинтетически активная радиация).

В то же время, каждый из вышеперечисленных геоморфометрических параметров отражает эрозионную активность в разной степени, подчеркивая ее отдельные черты. Поэтому необходимо определить оптимальный набор (минимально необходимое количество) геоморфометрических параметров рельефа, отражающих эрозионную активность и геоэкологическое состояние территории в комплексе и имеющих выраженный регистрируемый эффект. Для этого, как указывалось ранее, были проведены расчеты параметров на основе имитационной модели и на репрезентативных участках (Онежский полуостров и Беломорско-Кулойского плато) для оценки «достаточности» регистрируемого эффекта.

Расчеты проводились также с разным размером «окон» осреднения для подбора оптимальной для выделения структур разных рангов (рис. 3.4).

Анализ степени выраженности эрозионных процессов и особенностей исследуемой территории показал, что для оценки степени эрозионной активности наиболее оптимальными являются следующие геоморфометрические параметры:

1) для общего геоэкологического районирования: углы наклона, LS фактор, индекс расчлененности рельефа и индекс влажности;

2) для оценки активности погребенного карста – плотность бессточных впадин;

3) такие геоморфометрические параметры, как угол наклона, профильная и плановая кривизна, индекс Треха и индекс расчлененности

рельефа позволяют выделить зоны с максимальным развитием эрозионных процессов.

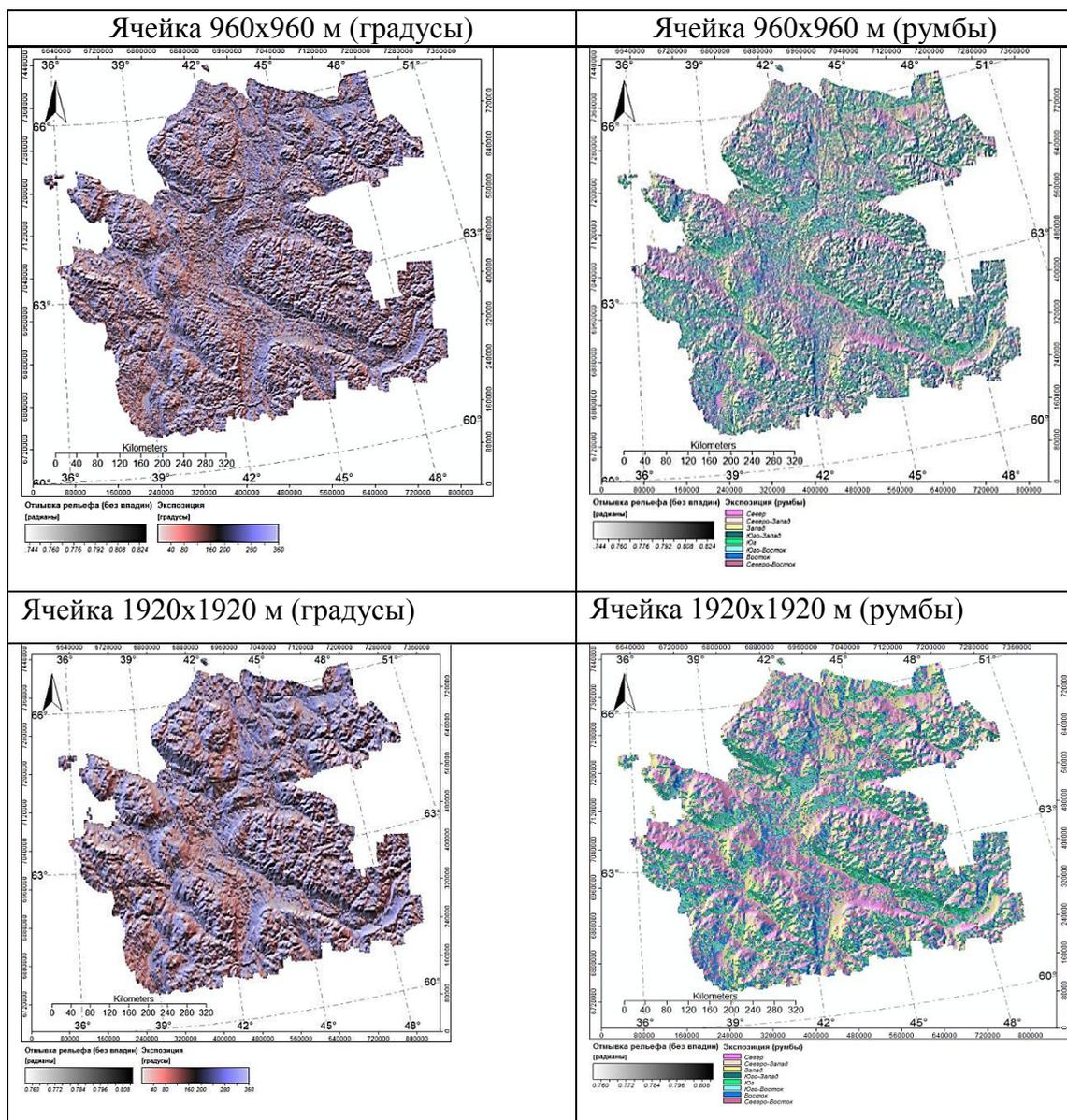


Рисунок 3.4. Экспозиция склонов с разным размером ячейки

Рассмотрим вышеперечисленные геоморфометрические параметры более подробно.

1. Угол наклона (уклон) поверхности (Slope)

Угол наклона (Slope) – это угол между горизонтальной плоскостью и касательной плоскостью, определенной градиентом. Поскольку сам уклон поверхности является причиной возникновения эрозии (Михайлов, 2000), то величина уклона поверхности во многом определяет интенсивность эрозионных процессов. Уклон поверхности характеризует интенсивность

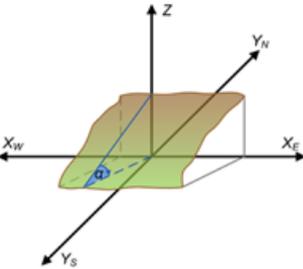
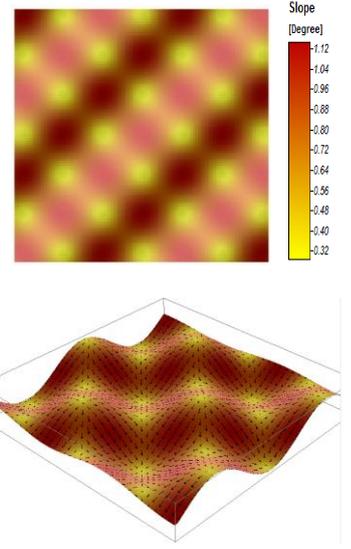
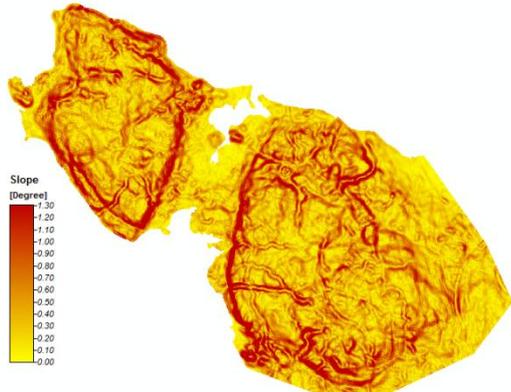
изменения значения высоты между двумя точками (применительно к ЦМР – между двумя ячейками растра). Это угол наклона в точке пересечения между горизонтальной плоскостью и касательной к земной поверхности и вычисляется либо по классической формуле (3.5) (Geomorphometry .., 2009), либо по формуле (3.6) Zevenbergen L.W., Thorne C.R., (1987), применяемой в ГИС SAGA:

$$SLOPE = \arctan(\nabla Z) \quad (3.5)$$

$$SLOPE = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2}) \quad (3.6)$$

Пример расчета уклона поверхности приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Пример расчета уклона поверхности

Угол наклона и формула расчета	Расчет угла наклона по теоретической ЦМР	Расчет реальной ЦМР
 <p data-bbox="231 1422 534 1512"> $SLOPE = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2})$ </p>		

Уклон поверхности – фундаментальный геоморфометрический параметр, закономерно связанный со следующими процессами и характеристиками ландшафта:

1) поверхностный сток и дренирование – чем более крутой склон, тем интенсивнее поверхностный сток и меньше инфильтрация влаги в почвенную

толщ. Таким образом, уклон имеет принципиальное значение для режима увлажнения почв, особенно – верхних слоев;

2) эрозия – интенсивность эрозии растет экспоненциально с увеличением уклона. Это объясняется тем, что с увеличением градиента кинетическая энергия осадков остается постоянной, но транспорт ускоряется в направлении подножья. В результате, кинетическая энергия стока превышает кинетическую энергию осадков, когда склон переходит отметку $8,5^\circ$, что и способствует проявлению эрозионных процессов;

3) мощность почвенного профиля на склоне закономерно изменяется в соответствии с уклоном и относительной высотой. Как правило, почвенный слой меньше на возвышенных наклонных участках вследствие эрозионных процессов и гравитационного перемещения материала, и постепенно увеличивается в направлении пониженных участков с небольшим уклоном;

4) количество солнечной энергии также зависит от уклона, т.к. он определяет угол падения солнечных лучей на земную поверхность. Увеличение уклона поверхности в направлении поступления солнечных лучей увеличивает угол их падения, а значит – количество энергии, которое получает поверхность. Это определяет микроклиматические особенности участка, в частности температуру, эвапотранспирацию и влажность верхних слоев почвы;

5) особенности растительного покрова совокупно отражают все вышеперечисленные характеристики, поскольку они прямо или косвенно влияют на такие эдафические факторы как водный и температурный режим почвы, механический состав корнесодержащего слоя, содержание питательных элементов и т.д. (<http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>).

Градация уклона поверхности приведена в таблице 3.2.

2. Кривизна (Curvature)

Параметры, характеризующие вогнутость и выпуклость рельефа, в общем смысле называются кривизной рельефа (Geomorphometry .., 2009).

Таблица 3.2 Градации уклона поверхности (Жучкова, Раковская, 2004)

Меньше 1°	Плоские (субгоризонтальные) равнины
1°-3°	Слабонаклонные равнины (очень пологие склоны)
3°-5°	Пологие склоны (наклонные равнины)
5°-7°	Слабопокатые склоны
7°-10°	Покатые склоны
10°-15°	Сильнопокатые склоны
15°-20°	Крутые склоны
20°-40°	Очень крутые склоны
Больше 40°	Обрывистые склоны

Геометрический смысл кривизны заключается в понятии плоской кривой. Кривизна определяется как отношение 1 к радиусу окружности, на которой лежит данная точка кривой (рис. 3.5) (Geomorphometry .., 2009).

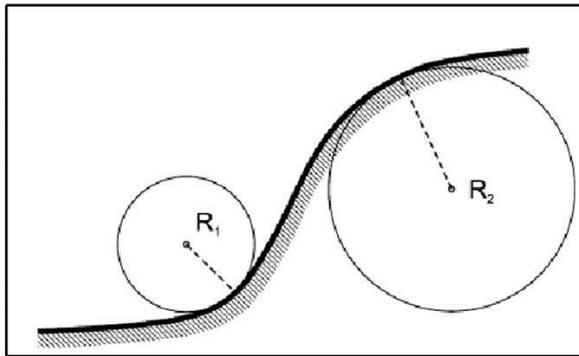


Рисунок 3.5. Геометрический смысл кривизны (Geomorphometry .., 2009)

Различают следующие виды кривизн: горизонтальную (плановую, тангенциальную и перекрестную), вертикальную (профильную и продольную) и обобщенную (общую, минимальную, максимальную и суммарную) кривизну.

Вертикальная (профильная) кривизна – кривизна линии, образованной пересечением земной поверхности с плоскостью, перпендикулярной к направлению ориентации максимального градиента (экспозиции). Как производная второго порядка, горизонтальная кривизна описывает градиент экспозиции вдоль заданного контура (<http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>).

Положительные значения профильной кривизны характеризуют выпуклые участки рельефа, отрицательные – вогнутые (рис. 3.6).

Однако расчет профильной кривизны по алгоритму авторов Zevenbergen L.W., Thorne C.R (1987) предусматривает умножение на -2, следовательно, отрицательные значения профильной кривизны, рассчитанной по этому алгоритму, будут характеризовать вогнутые участки, а положительные – выпуклые, так же, как и значения плановой кривизны.

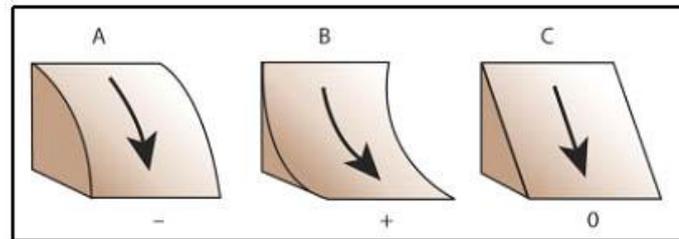


Рисунок 3.6. Интерпретация значений профильной кривизны (Buckley, 2011):

A – отрицательные значения (выпуклые участки); B – положительные значения (вогнутые участки); C – нулевое значение (плоские участки)

Поскольку профильная кривизна является мерой изменения градиента, она может быть использована для характеристики скорости стока и процессов транспорта осадков, т.е. так называемого второго механизма аккумуляции. На вогнутых участках скорость поверхностного и внутрипочвенного стока замедляется, а на выпуклых – ускоряется. Таким образом, при помощи вертикальной кривизны можно определять местоположение зон аккумуляции материала на вогнутых участках и зон его сноса – на выпуклых (<http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>).

Горизонтальная кривизна описывает так называемый первый механизм аккумуляции, который зависит от способности потока сворачиваться по мере движения по земной поверхности. Области с отрицательной плановой кривизной характеризуют зоны конвергенции, где происходит схождение линий тока (рис. 3.7). Области с положительной плановой кривизной характеризуют зоны дивергенции, где происходит расхождение линий тока. Благодаря этому плановая кривизна может быть использована для различия гребней, которым свойственен снос материала, в т.ч. и загрязняющих

веществ (ВВ), и долин, которые этот материал аккумулируют (<http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>).

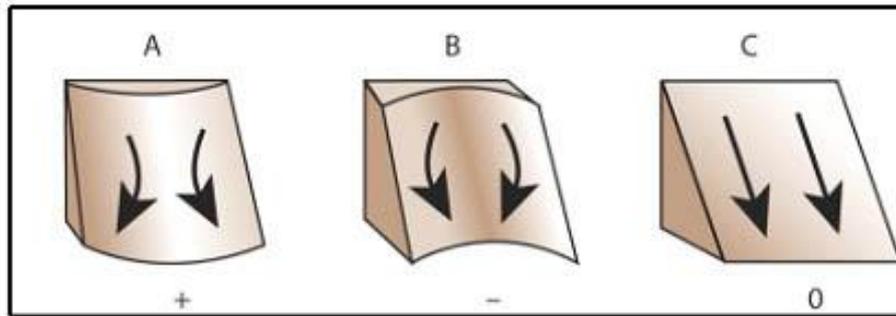


Рисунок 3.7. Интерпретация значений плановой кривизны (Buckley, 2011):

А – положительные значения (выпуклые участки); В – отрицательные значения (вогнутые участки); С – нулевое значение характеризует плоские участки

Т.е. отрицательные значения плановой кривизны свидетельствуют о расхождении потоков (доминирует эрозия/размыв), положительные – о слиянии потоков (преобладает аккумуляция).

Таким образом, вертикальная кривизна определяет закономерности эрозии и аккумуляции, а горизонтальная – пространственную неоднородность стока.

Одновременный учет их обеих помогает лучше понять закономерности перераспределения материала по поверхности в жидкой или твердой форме. Простейшим обобщением этих закономерностей является классификация форм рельефа Ф. Трёха (Troeh, 1964), основанная на знаках вертикальной и горизонтальной кривизн (рис. 3.8).

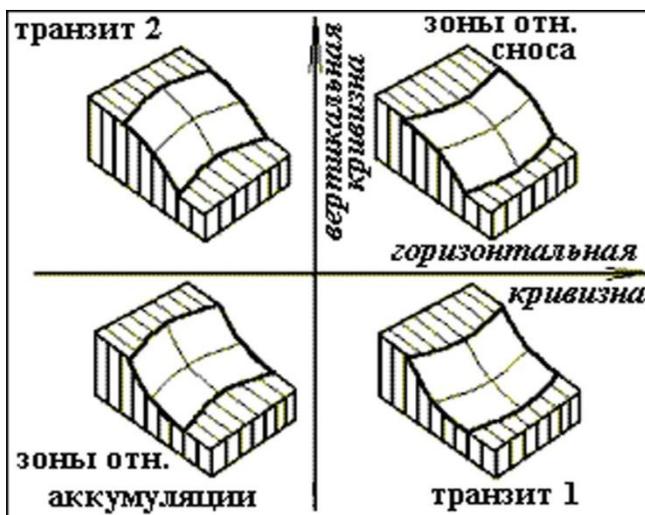


Рисунок 3.8. Типы форм рельефа классификации Трёха (совокупность плановой и профильной кривизн) (Шарый 2006, Troeh, 1964).

Зоны относительной

аккумуляции в ней отвечают одновременному действию двух механизмов аккумуляции, а зоны относительного сноса – одновременному действию этих механизмов в противоположном направлении (<http://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html>). Для обобщения информации о кривизне поверхности в разных направлениях используется синтезирующий показатель, который в зависимости от метода расчета может быть выражен как минимальная (minimal), максимальная (maximal), суммарная (total) или общая кривизна (general curvature). В данном случае речь идет про общую кривизну как совокупную меру кривизны земной поверхности, которая идентифицирует ее выпуклые участки положительными значениями, а вогнутые – отрицательными независимо от направления.

Практическое удобство общей кривизны состоит в том, что она в равной мере характеризует оба механизма аккумуляции. Уклон поверхности характеризует относительную интенсивность сноса материала, а экспозиция – его направление.

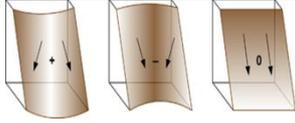
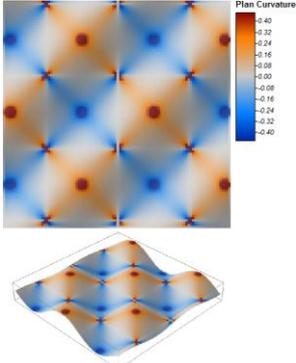
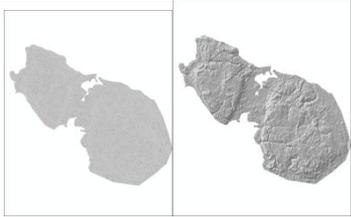
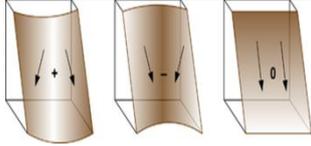
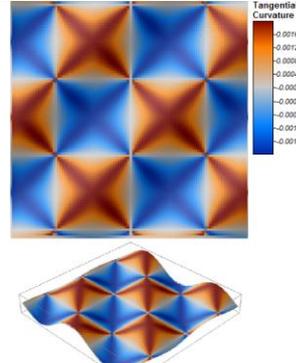
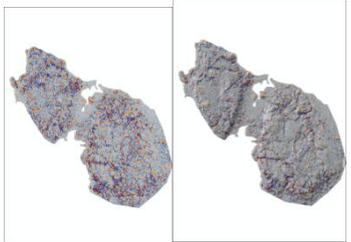
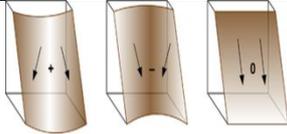
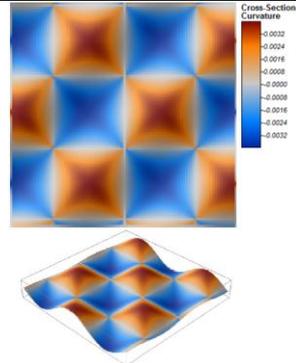
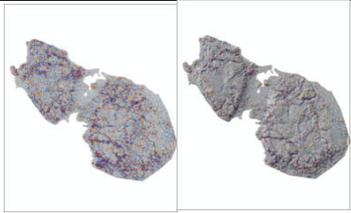
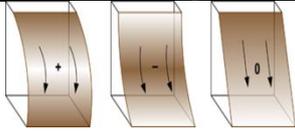
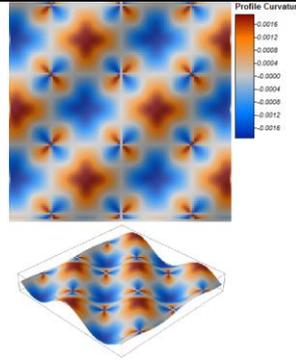
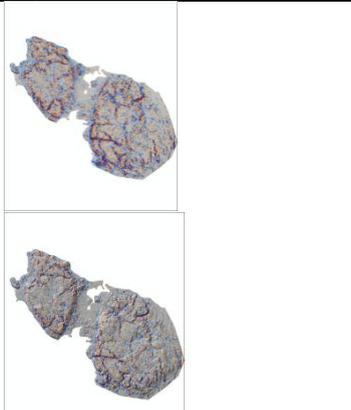
Для выбора типов кривизн для расчета было проведено их сопоставление как по упрощенной теоретической ЦМР, так и по реальной (территория Онежского полуострова (табл. 3.3)).

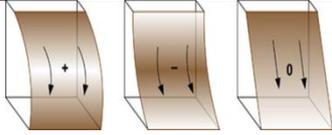
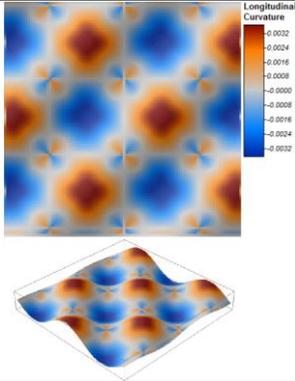
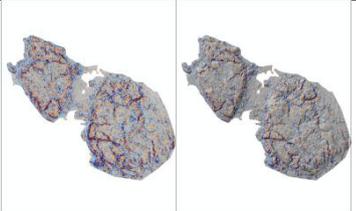
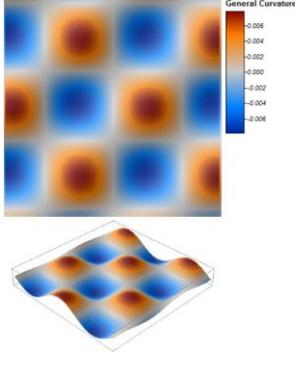
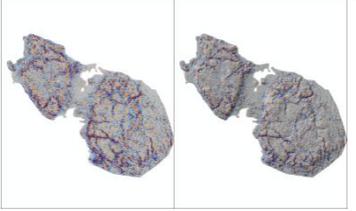
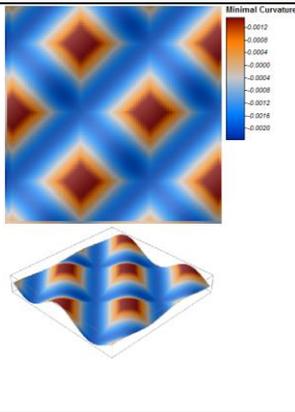
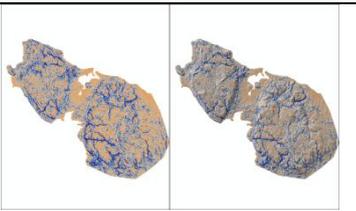
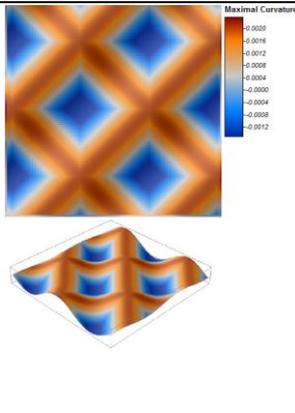
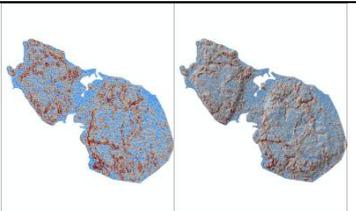
В результате проведенного анализа были, для расчета по всей территории Архангельской области, выбраны поперечная (горизонтальная) и продольная (вертикальная) кривизны. Для применения кластерного анализа были выбраны профильная и плановая кривизны. Также было проведено выделение форм рельефа по классификации Трёха (Troeh, 1964).

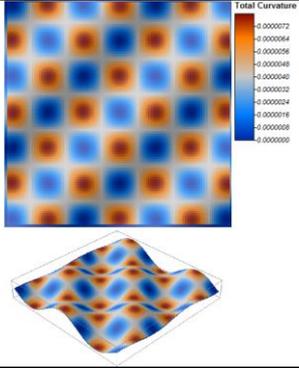
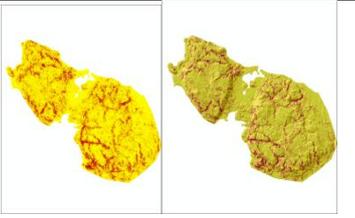
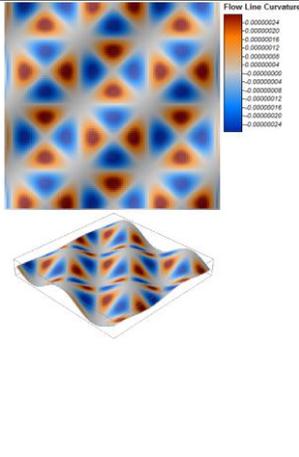
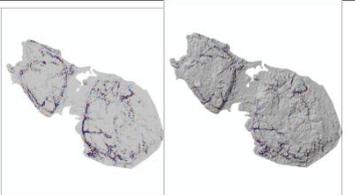
3. Индекс расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index)

Индекс расчлененности рельефа (TRI) служит для объективной количественной оценки изрезанности (неоднородности) рельефа. Применительно к цифровой модели рельефа индекс расчлененности равняется среднему значению перепада высот между конкретной ячейкой и ее ближайшими восемью соседними (Shawn et al., 1999).

Таблица 3.3 Сопоставление типов кривизн

Горизонтальная кривизна: (+) расхождение, (форма - выпуклость, бугор, вал, поднятие); (-) схождение, (форма – вогнутость, яма, канава, опускание(борозда)).			
Название	Формула расчета по Zevenbergen L.W., Thorne C.R (1987)	Расчет кривизн по теоретической ЦМР	Расчет реальной ЦМР (слева – карта значений кривизны, справа – наложенная на отмытку рельефа.)
<p>Plan Curvature - Плановая кривизна (общий тренд для больших окон)</p>	 $PlanC = -\frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)^{1.5}}$		
<p>Tangential Curvature Тангенциальная кривизна (Локальный тренд, для малых окон)</p>	 $TanC = -\frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)\sqrt{G^2 + H^2}}$		
<p>Cross-Sectional Curvature - Поперечная кривизна (перекрёстная) (Усиление локальной составляющей)</p>	 $CrossC = -2\frac{(2EG^2 + 2DH^2 - FGH)}{G^2 + H^2}$		
<p>Вертикальная кривизна. Возможность: (+) сноса; (-) накопления. Узкие, протяженные объекты (русла рек и водотоки)</p>			
<p>Profile Curvature - Профильная кривизна (локальный тренд)</p>	 $ProfC = -\frac{(2DG^2 + 2EH^2 + 2FGH)}{(G^2 + H^2)(1 + G^2 + H^2)^{1.5}}$		

<p>Longitudinal Curvature - Продольная кривизна (усиление локального тренда)</p>	 $LongC = -2 \frac{(2DG^2 + 2EH^2 + FGH)}{G^2 + H^2}$		
<p>Обобщенная кривизна, изменение отношения 1/r в горизонтальном направлении и вертикальном направлении (для обобщения информации о кривизне земной поверхности в обоих направлениях)</p>			
<p>General Curvature - Общая кривизна (для региональной оценки всей площади)</p>	$GC = -2(2D + 2E) = -4(D + E)$		
<p>Minimal Curvature - Минимальная кривизна. Значения > 0 соответствуют холмам, значения < 0 – долинам. Используется для выявления геологических структур.</p>	$MinC = -\frac{2D}{2} - \frac{2E}{2} - \sqrt{0.5(2D - 2E)^2 + F^2}$		
<p>Maximal Curvature - Максимальная кривизна. Значения > 0 соответствуют хребтам, значения < 0 – впадинам. Используется для выявления геологических структур</p>	$MaxC = -\frac{2D}{2} - \frac{2E}{2} + \sqrt{0.5(2D - 2E)^2 + F^2}$		

<p>Total Curvature - Суммарная кривизна. Оценка полной амплитуды всех характеристик (есть, нет)</p>	$TC = 4D^2 + 2F^2 + 4E^2$		
<p>Flow Line Curvature – Поточная кривизна. Характер закрученности потока (подмыва склона): (+) По часовой (на Восток), (-) Против часовой (на Запад), (0) Поток прямой, без закручивания.</p>	$FLC = (G^2 - H^2)F - GH(2D - 2E)$		

Значение индекса расчлененности рельефа рассчитывается по следующей формуле (Riley et al., 1999):

$$TRI = \sqrt{\sum (h_{0,0} - h_{i,j})^2}, \quad (3.7)$$

где

$h_{0,0}$ – значение высоты рассматриваемой ячейки ЦМР;

$h_{i,j}$ – значения высот каждой из 8 смежных ячеек.

В целом, формулу индекса расчлененности можно сравнить с формулой стандартного отклонения:

$$s = \sqrt{\frac{n}{n-1}\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.8)$$

где

x_i — i -й элемент выборки; n — объём выборки; \bar{x} — среднее арифметическое выборки

Отличие заключается в том, что в формуле индекса расчлененности вычитается не среднее арифметическое, а значение высоты рассматриваемой ячейки, и разность не делится на $(n - 1)$.

Некоторые авторы (Riley et al., 1999) предлагают использовать методы классификации для выделения групп значений TRI (0-80 м, 81-116 м и так далее). В зависимости от выбранного метода и полученных значений TRI, граничные значения групп могут быть разными. А далее называть группы как «однородные», «почти однородные», «слегка изрезанные», «средне-изрезанные», «умеренно изрезанные», «очень изрезанные», «чрезвычайно изрезанные» области.

Пример расчета TRI для 9 ячеек приведен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 Пример расчета TRI для 9-ти ячеек

Исходные данные			Шаг первый			Шаг второй		
20	20	10	-15	-15	-5	225	225	25
-1,-1	0,-1	1,-1	-1,-1	0,-1	1,-1	-1,-1	0,-1	1,-1
30	5	10	-25	0	-5	625	0	25
-1,0	0,0	1,0	-1,0	0,0	1,0	-1,0	0,0	1,0
30	20	30	-25	-15	-25	625	225	625
-1,1	0,1	1,1	-1,1	0,1	1,1	-1,1	0,1	1,1
			Сначала в каждой ячейке рассчитывается разность $(d_{i,j})$ ее высоты $(h_{i,j})$ с высотой рассматриваемой ячейки $(h_{0,0})$ по формуле $d_{i,j} = h_{0,0} - h_{i,j}$.			Далее возводятся в квадрат все полученные разности		
Среднее значение перепада высот между ячейкой (0, 0) и окружающими ее ячейками будет равняться: среднее значение перепада высот между ячейкой (0, 0) и окружающими ее ячейками будет равняться:								
$TRI = \sqrt{225 + 225 + 25 + 625 + 0 + 25 + 625 + 225 + 625} = \sqrt{2600} \approx 51$								

4. Топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index)

Применительно к цифровым моделям рельефа топографический индекс влажности (*TWI*) – это параметр, описывающий склонность конкретной ячейки раstra к накоплению в ней воды, т.е. склонность к аккумуляции

(Geomorphometry..., 2009) осадков и, соответственно, загрязняющих веществ. *TWI* вычисляется по формуле:

$$TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan(\beta)}\right) \quad (3.9)$$

где A – это значение удельной водосборной площади в конкретной ячейки растра, β – это локальный уклон (угол наклона).

Топографический индекс влажности – показатель гидроморфности почвенного покрова, который во многом определяется особенностями рельефа территории. Он позволяет оценить предпосылки к развитию переувлажненных земель и развитию процессов заболачивания, а также учесть данный фактор при планировании оптимизационных (мелиоративных) мероприятий (Глотов, 2013).

Наличие вышеперечисленной информации позволяет, в первую очередь, оптимизировать структуру сельскохозяйственного землепользования, учесть характер развития негативных природных процессов и потенциальную деградацию сельскохозяйственных угодий с целью рационального использования земельных ресурсов. В геоэкологии *TWI* позволяет выделять площади преимущественной аккумуляции осадков.

5. Индекс потенциала плоскостной эрозии (LS Factor)

Важным аспектом исследования эрозионных процессов является изучение водной эрозии. Под водной эрозией понимают процесс смыва и размыва почвы и пород поверхностным стоком временных водных потоков, возникающих главным образом в результате таяния снега или дождевых осадков (Танасиенко, 1999). Поэтому был вычислен так называемый индекс потенциала плоскостной эрозии (LS фактор) в универсальном уравнении водной эрозии (модель USLE), который учитывает угол наклона и длину склонов (Mitasova et al., 1995). Чем больше значение данного коэффициента, тем выше влияние рельефа на процессы водной эрозии. Длина (L) и крутизна (S) склонов оказывают большое влияние на развитие эрозионных процессов. Оба этих показателя по отдельности выражены в универсальном уравнении потери почвы, однако, в прикладных задачах зачастую бывает более

эффективно рассматривать их в совокупности как единый топографический показатель, называемый фактором длины и крутизны склонов, или индексом потенциала плоскостной эрозии. Он рассчитывается по следующей формуле (Wischmeier, Smith, 1978):

$$LS=(\lambda/22,13)t(65,4\sin 2\beta+4,56\sin\beta+0,0654), \quad (3.10)$$

Универсальное уравнение почвенной эрозии (The Universal Soil Loss Equation, USLE) применяется для расчета средней эрозии почвы на единицу площади. Уравнение было опубликовано в 1965 году Wischmeier W.H, Smith D.D. и другими учеными. В 1978 году, когда были проведены новые исследования, эксперименты и получены новые данные, уравнение было пересмотрено и стало называться RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

Оба уравнения USLE и RUSLE в общем виде записываются следующим образом:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P, \text{ где} \quad (3.11)$$

A – предполагаемая средняя эрозия почвы в тоннах на акр в год;

R – фактор влияния на эрозию осадков и стока;

K – фактор влияния на эрозию размываемости почвы;

L – фактор влияния на эрозию длины склона;

S – фактор влияния на эрозию крутизны склона;

C – фактор влияния на эрозию почвенного покрова (растительный покров, почвенный покров, биомассы, процессы разрушения почвы);

P – фактор влияния на эрозию сельско-хозяйственной деятельности.

Разница между оригинальным и пересмотренным уравнением заключается в формулах расчета отдельных факторов. Ограничение оригинального уравнения заключается в том, что с помощью него эффективно предсказывать можно только эрозию на умеренных склонах, чувствительных к поверхностной и капельной эрозии. К тому же, оригинальное уравнение слишком зависит от значений угла наклона;

отмечается, что ошибка порядка 10% в расчетах угла наклона может привести к 20% ошибке в прогнозировании почвенной эрозии (Pelton et al., 2015). Все эти ограничения оригинального уравнения послужили причиной для его пересмотра и разработки уравнения RUSLE.

L и S факторы в целом описывают влияние длины и крутизны склона на эрозию почвы на этом склоне. Комбинацию двух факторов часто называют «топографическим фактором».

L фактор равен отношению горизонтальной длины склона к 22.1 метру. S фактор равен отношению угла наклона склона к углу наклона 9%. LS фактор равен 1 на склоне длиной 22.1 метр и крутизной 9%.

LS-фактор в оригинальном уравнении USLE рассчитывается по следующей формуле:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065), \quad (3.12)$$

где λ – горизонтальная длина склона; θ – угол наклона; m – переменная, зависящая от типа рельефа и почвы, ее значение варьируется в диапазоне от 0.2 (склоны меньше 1%) до 0.5 (склоны 5% и больше).

LS-фактор в пересмотренном уравнении RUSLE рассчитывается по следующим формулам:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m \quad (3.13)$$

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03, \quad \text{если} \quad \text{slope gradient} \leq 9\%$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.50, \quad \text{если} \quad \text{slope gradient} > 9\% \quad (3.14)$$

Как видно из (3.14) формула S-фактора отличается в зависимости от угла наклона, что позволяет более точно описать различные формы рельефа. Это важно, так как результирующие значения LS-фактора (и RUSLE в целом) очень чувствительны к значениям S-фактора.

Различными учеными предложено несколько методов расчета значений LS-фактора средствами ГИС-систем. В SAGA GIS LS-фактор рассчитывается по методу предложенному Moore I. D. и др. (1991):

$$LS = \left(\frac{As}{22.13}\right)^m \times \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^n, \quad (3.15)$$

где $m = 0.4 - 0.6$; $n = 1.2 - 1.3$; A_s – удельная водосборная площадь; β – угол наклона в градусах.

LS Factor описывает ожидаемое соотношение количества почвы на единицу площади, смытой с участка крутизной 9% ($\sim 4^\circ$) и длиной 76.2 фута (~ 23 метра) (Wischmeier, Smith, 1978). Чем больше значение данного коэффициента, тем выше влияние рельефа на процессы водной эрозии.

Расчет LS Factor приведен на рис. 3.9.

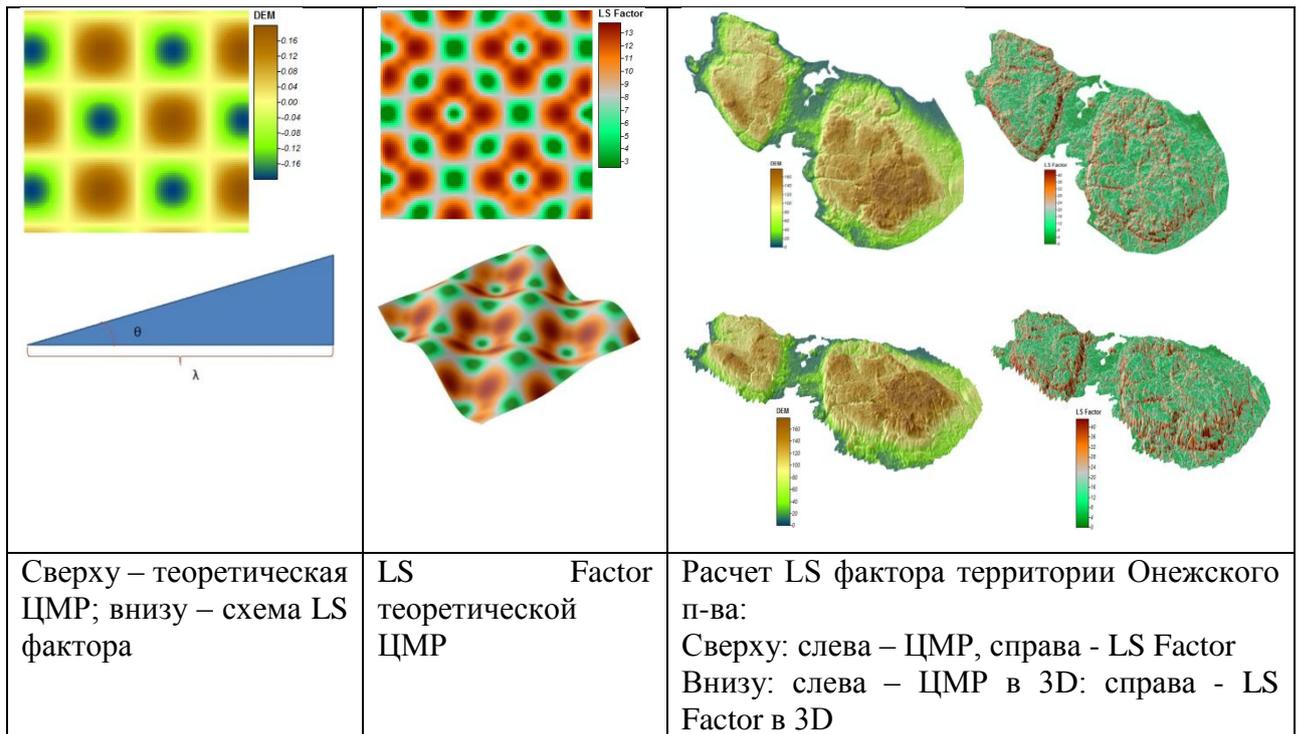


Рисунок 3.9. Пример расчета LS фактора

6. Бессточные впадины.

Как указывалось ранее, перед тем, как проводить на основе ЦМР гидрологическое моделирование, такую модель необходимо должным образом подготовить так, чтобы можно было считать ее «гидрологически корректной». В большинстве цифровых моделей рельефа содержится множество понижений рельефа, выраженных в виде площадей без стока и часто называемых впадинами. (Zhu et al., 2013).

Обычно процедура заполнения впадин проводится для создания «гидрологически корректной» модели без дальнейшего анализа пространственных закономерностей распределения бессточных впадин. Т.е.,

выделяемые впадины рассматриваются как некие артефакты. В тоже время их пространственное распределения по территории исследования говорит о преобладающей природной составляющей. Кроме подготовки «гидрологически корректной» модели рельефа, эта процедура позволяет оценить глубину заполнения, т.е. потенциальную емкость бессточных впадин не только для осадков, но и косвенно для загрязняющих веществ.

Маска заполнения впадин и пространственное распределение глубины впадин показаны на рис. 3.10.

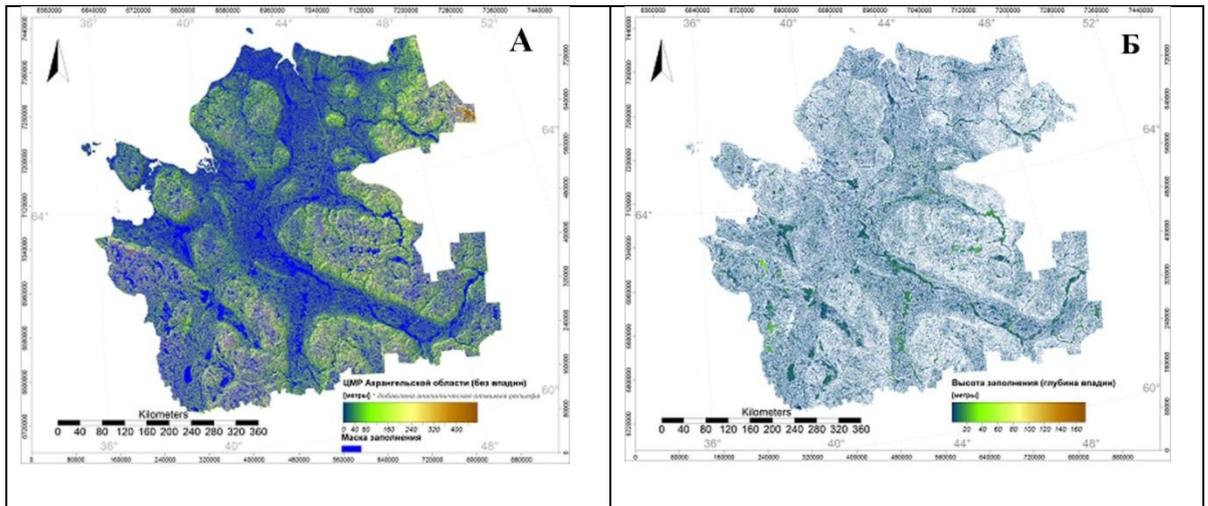
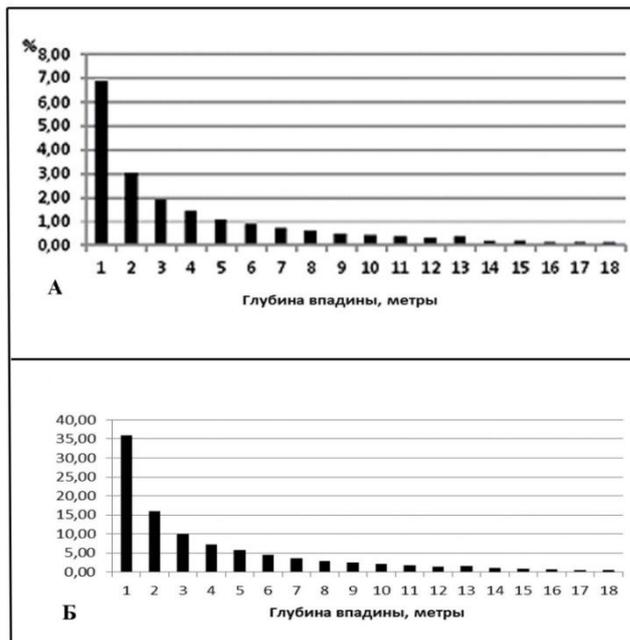


Рисунок 3.10. Заполнение впадин ЦФР территории Архангельской области
А – маска заполнения впадин, **Б** – глубина заполнения впадин

Общее количество ячеек в ЦФР – 344650349, из них заполнено – 130705668 (38 % территории). В целом значения глубин впадин от 1 до 21 м,



доминирующей является глубина 1 м (45 %), глубины 1-5 м занимают 81 % от всей выборки (рис. 3.11).

Рисунок 3.11. Распределение высот заполнения глубин (ячейка 960x960 м)

А – доля от всей территории, %; **Б** – доля

Таким образом, емкость впадин для заполнения осадками и загрязняющими веществами, относительно, невелика, в основном 1-5 м. Как и в распределение высот, наблюдается уменьшение значений параметра при применении окон, но остается общая закономерность в распределении.

Наиболее глубокие впадины пространственно совпадают с поймами крупных рек (рис. 3.10А) и обусловлены, скорее всего, наличием стариц, а не артефактами (во всяком случае, далеко не все), что наиболее отчетливо видно при использовании ячейки 1920×1920 м (рис. 3.12).

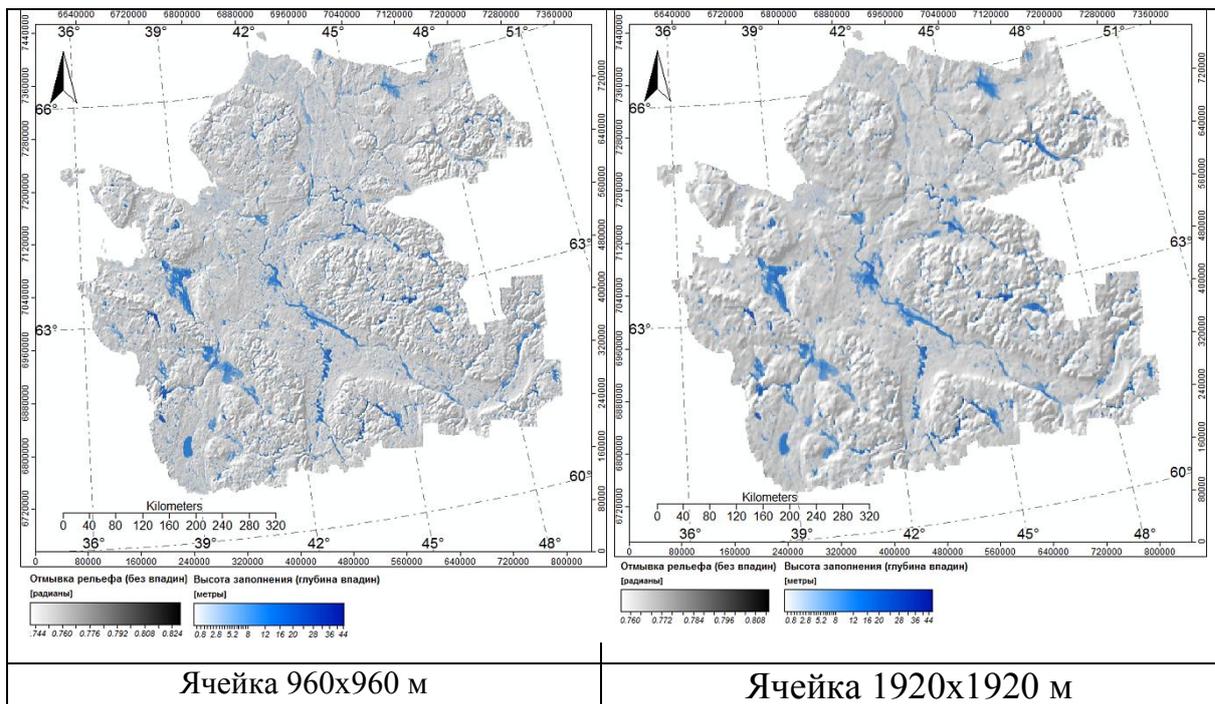


Рисунок 3.12. Заполнение впадин ЦФР территории Архангельской области с разными ячейками

Примененный диссертантом в исследовании метод L. Wang и H. Liu (2006), позволяет одновременно определять как направления потоков, так и пространственное разделение водоразделов. Таким образом, направление потоков можно использовать для оценки простираия впадин (рис. 3.13) и совпадения их с тектоническими структурами.

Общее количество ячеек с потоками отражает 65 % территории. Доминирующим является меридиональное простираие – 24 %, наиболее слабо представленным – западное (5 %) и северо-западное (1 %).

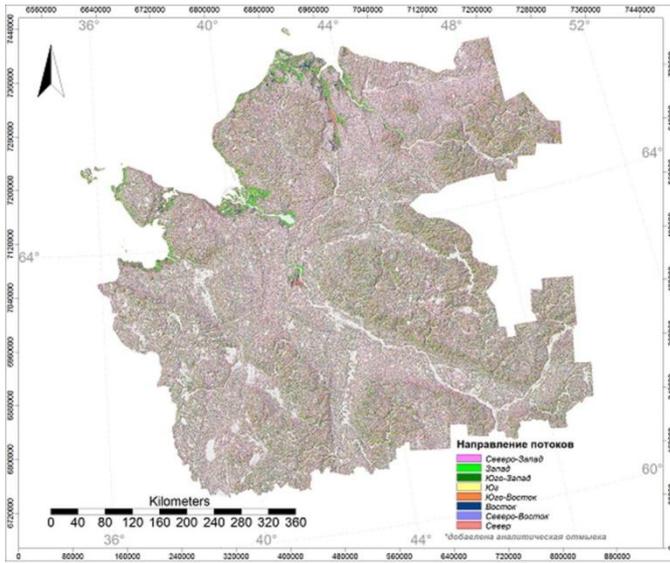


Рисунок 3.13. Направление потоков

Статистическое распределение потоков отражено на рис. 3.14 и в таблице 3.5.

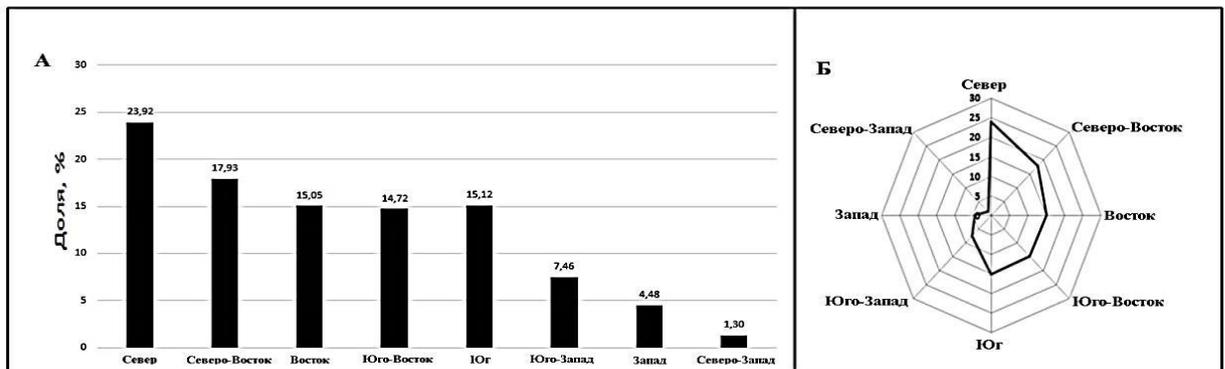


Рисунок 3.14. Статистическое распределение потоков
А – гистограмма; Б – роза-диаграмма

Таблица 3.5. Статистическая характеристика направления потоков

Общее количество ячеек	344650349	
Общее количество ячеек с потоками	225446774	
Количество ячеек	Направление потока	Процент
53934145	Север	23,92
40430296	Северо-Восток	17,93
33935944	Восток	15,05
33196369	Юго-Восток	14,72
34088085	Юг	15,12
16825168	Юго-Запад	7,46
10111101	Запад	4,48
2925666	Северо-Запад	1,30

Полученный вывод по преобладающему простиранию достаточно интересен не только с геоэкологической точки зрения, но и с геологической. Так проведенный ранее анализ (Кутинов, Чистова, 2004; Кутинов и др., 2012) показал такое доминирующее меридиональное простирание границ вендских отложений на территории Юго-Восточного Беломорья, в парных направлениях трубок взрыва и их статистических параметрах (рис. 3.15).

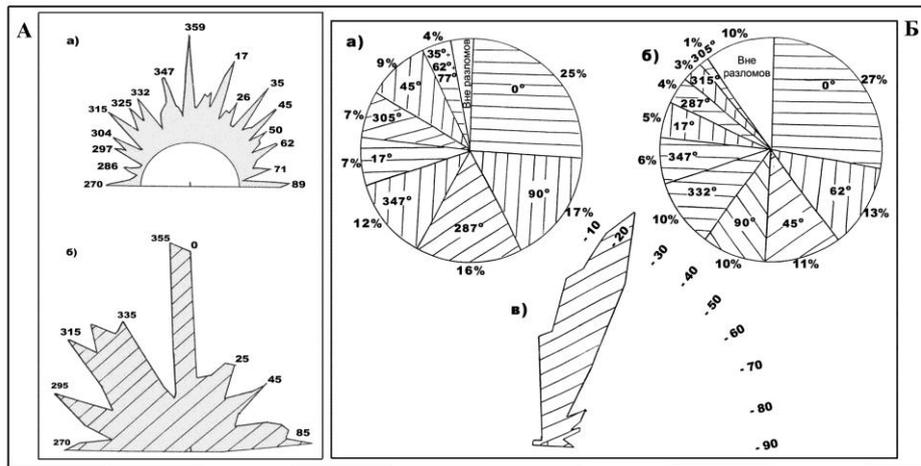


Рисунок 3.15. Схема сопоставления материалов:

А – розы-диаграммы: а) спрямленных отрезков геологических границ вендских отложений; б) парных направлений трубок взрыва; Б – частоты встречаемости трубок взрыва: а) в региональных; б) в локальных разломах; в) роза-диаграмма ориентировки длинных осей трубок взрыва

Помимо вышеперечисленных геоморфометрических факторов для геоэкологической оценки водосборных площадей необходимо проведение бассейнового районирования территории, т.е. необходимо определение общей водосборной площади (Catchment Area) и удельной водосборной площади (Specific Catchment Area).

Понятие водосборной площади имеет большое значение при гидрологическом и геоэкологическом анализе, так как этот параметр определяет площадь участка, осадки с которого (дождь, таяние снега и так далее) могут быть суммированы. Применительно к цифровым моделям рельефа можно говорить об общей водосборной площади и рассматривать ячейку ЦМР как некоторый конечный участок площади, в котором суммируются осадки (при расчете средствами ГИС значение конкретной ячейки ЦМР равно площади участка, с которого стекаются потоки в данную

конкретную ячейку). Более фундаментальное понятие – это удельная водосборная площадь, данный параметр характеризует водосборную площадь, приходящуюся на единицу измерения (Geomorphometry..., 2009).

Стоит отметить, что удельная водосборная площадь, как более основополагающий параметр, в ГИС используется для расчета ряда так называемых топографических индексов (индекс влажности, индекс мощности эрозии, индекс потенциала плоскостной эрозии и так далее). Общая же водосборная площадь может быть применена как иницилирующее значение при выделении речной сети, так как при построении раstra общей водосборной площади четко выделяется древовидная структура потоков речной сети, что обосновывается смысловым содержанием этого параметра. С помощью раstra водосборной площади средствами ГИС можно выделить потоки, собирающие осадки с участков конкретной заданной площади, регулируя, таким образом, детализацию полученной сети (от крупных рек до мелких притоков).

Модуль «Catchment Area (Top-Down)» SAGA GIS позволяет рассчитать водосборную площадь – площадь, с которой стекается вода в определённую ячейку ЦМР. В расчётах используется метод «Multiple Flow Direction», который учитывает направление потока из целевой ячейки в каждую из окружающих её ячеек, а не только в самую низкую. Доля воды, которая стекается из целевой ячейки в одну из её соседних, определяется по формуле (Freeman, 1991):

$$f_i = \frac{\max(0, \text{Slope}_i^p)}{\sum_{j=1}^8 (\max(0, \text{Slope}_j^p))}, \quad (3.16)$$

где Slope_i – угол наклона в целевой ячейке, Slope_j – угол наклона в j -той соседней ячейке ($j=1..8$), p – коэффициент сходимости потоков, настраиваемый параметр, по умолчанию равен 1.1.

Пример расчета общей водосборной площади приведен на рис. 3.16.

Выводы:

- расчет выбранных геоморфометрических параметров рельефа позволяет создать комплект монофакторных геоэкологических карт, позволяющих выделить зоны сноса и накопления осадочного материала, оценить пространственное положение и дать количественные характеристики процессам эрозии и аккумуляции и выделить зоны транзита осадочного материала, а также оценить потенциальную устойчивость и/или склонность к эрозии различных участков исследованной территории.

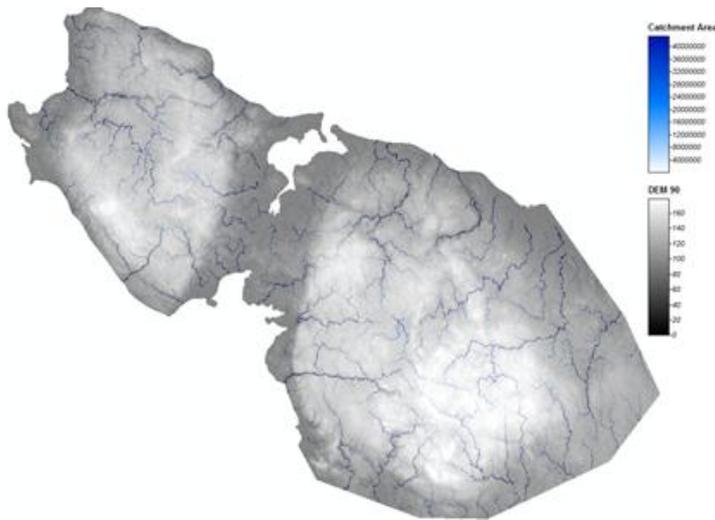


Рисунок 3.16. Пример расчета общей водосборной площади

- Применение анализа рельефа является кроме геоэкологического и структурно-геологическим методом, позволяющим, при сравнительно малых затратах, выделять древние геологические структуры, проявляющиеся в современном рельефе благодаря следующим факторам: неотектонической унаследованности структурных планов более древнего заложения (Губин, Коркин, 1986; Кутинов 1991а; Милашев, 1979; Тяпкин, Кивелюк, 1982 и др.), (конформности неоструктурного плана), за счет процессов препарирования агентами денудации зон повышенной проницаемости, либо за счет так называемого эффекта просвечивания – приспособления поверхностных экзогенных процессов к границам скрытых глубинных масс различной плотности (Кутинов, 1991, а, б). Во-вторых, применение подобных методик имеет и самостоятельное значение, поскольку многие структурные формы, в том числе и рудоконтролирующие, устанавливаются лишь с помощью геоморфологических методов (Волчанская, 1981; Милашев, 1979 и др.).

Таким образом, определен оптимальный набор геоморфометрических параметров рельефа для геоэкологического районирования территории и разработана методика их анализа с использованием современных цифровых технологий (второе защищаемое положение).

3.3 Генерализация данных

При анализе рельефа необходима точная регистрация либо размеров контуров, либо их площадей (Кочкуркин, Кутинов, 2000). Последнее обстоятельство заставляет более подробно рассмотреть возможности и методы генерализации ЦМР.

При переходе от крупного масштаба к более мелкому и наоборот мы сталкиваемся с таким свойством ЦМР как генерализация. Генерализация преследует две цели: 1) соблюдение геометрической точности изображения; 2) сохранение содержательного соответствия. Эти цели находятся в противоречии друг к другу, поскольку геометрическая точность часто нарушается в угоду содержательному соответствию (Берлянд, 1986). Вследствие противоречивых свойств генерализации приемы анализа, которые требуют высокой картографической точности, эффективны только для тех карт (в том числе и экологического содержания), у которых генерализация минимальна. Но это требование значительно затрудняет выделение глобальных и региональных трендов. Сопоставление карт разного масштаба (и степени генерализации соответственно) показало существенное расхождение (до 50 %) в определении площадей контуров и их формы, особенно при эрозионном рельефе (Берлянд, 1986), представляющем первоочередной интерес при экологических исследованиях. При этом, как правило, уменьшается размер эрозионных долин и увеличивается – плоских водоразделов (Кочкуркин, Кутинов, 2000). С учетом слаборасчлененного характера рельефа исследуемой территории и точности высотного определения по используемой ЦМР, ряд локальных эрозионных форм

вообще не найдет своего отражения, особенно линейных (узко протяженных).

В зависимости от масштаба или протяженности, на первый план в формировании экосистем могут выходить различные факторы среды. Для континентальной части региона при мелкомасштабном изучении на первом плане окажутся определенные факторы климата и солнечной радиации (Григорьев, Будыко, 1956), а с увеличением детальности рассмотрения ситуация меняется, и связь экосистем и почв с рельефом начинает находить многочисленные проявления в отклонениях характеристик растительности и почв от общих черт зональности как внутри зоны (интразональные), так и близ ее границ (экстразональные) (Шарый, 2016).

Масштаб имеет два смысловых значения: детальность данных и их картографического выражения, или географический масштаб (Shary et al., 2005). Одну и ту же топографическую карту можно увеличить и уменьшить как угодно (например, на экране компьютера), но разрешение данных на ней от этого не изменится. С другой стороны, изменяя шаг решетки матриц факторов среды (то есть, меняя детальность), но представляя результаты в одном и том же географическом масштабе, можно получить разные результаты для связи изучаемой характеристики экосистем с факторами среды.

Например, в работе (Davies et al., 2007) разнообразия (числа) видов птиц с факторами среды изучалась при трех шагах решетки: 10 (~100 км), 20 и 40. Результаты существенно различались, и высота оказалась главным фактором среды только при шаге решетки 10. Соответствующая прогнозная карта показана на рис. 3.17.

Касаясь протяженности форм местности, еще В.В. Докучаев (1891, С.291) писал: «... между высотой местности и ее рельефом, с одной стороны, распределением черноземных почв, лесных земель, солонцов и дикой растительности (а вероятно, и животных) – с другой, в пределах Полтавской губернии наблюдаются постоянные закономерные отношения», комментируя

это так (там же): «Нет сомнения, что то же самое повторится и повсюду, раз наши исследования будут иметь дело с не слишком большими физико-географическими районами».

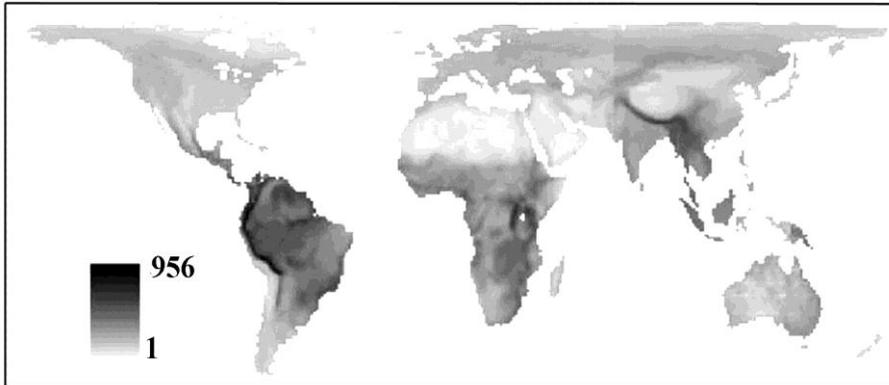
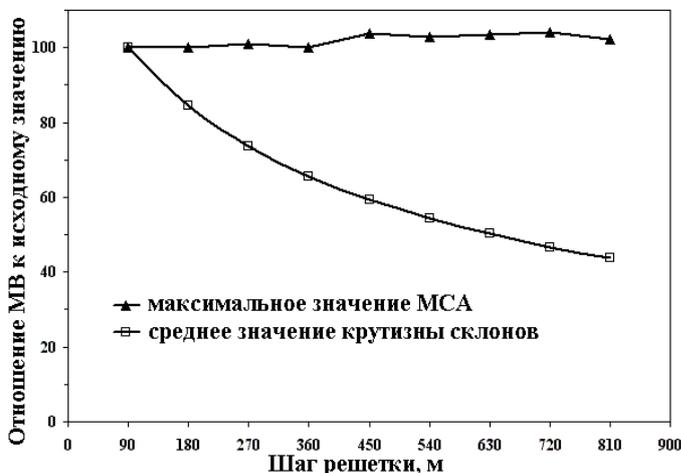


Рисунок 3.17. Прогнозная карта богатства видов птиц при разрешении 1° (Davies et al., 2007). Ведущие факторы среды при этом разрешении были высота и температура

Прогнозные модели, разработанные для конкретного физико-географического региона, могут быть неприменимы для другого из-за различий в геологических, климатических и других условиях. Тем не менее, из этого правила известны и исключения. Например, мелкомасштабная модель (шаг решетки 250 км) богатства видов деревьев и наземных позвоночных, разработанная для Северной Америки (Currie, 1991), была успешно применена для Великобритании (Guisan, Zimmermann, 2000).

Некоторые морфометрические величины сильно зависят от масштаба (шага решетки матрицы высот), другие менее сильно; этот вопрос изучался в работах (Evans, 1975; Shary et al., 2002, 2005). Например, средняя по региону крутизна склонов существенно зависит от шага решетки, в то время как



максимальное по матрице значение площади сбора слабо зависит от него (т.е. от масштаба) (рис. 3.18).

Рисунок 3.18. Сравнение зависимости максимального значения площади сбора и средней по той же местности крутизны от шага решетки

В целом, средняя по

местности крутизна возрастает с уменьшением шага решетки (Evans, 1975; Shary et al., 2002, 2005) (рис. 3.19).

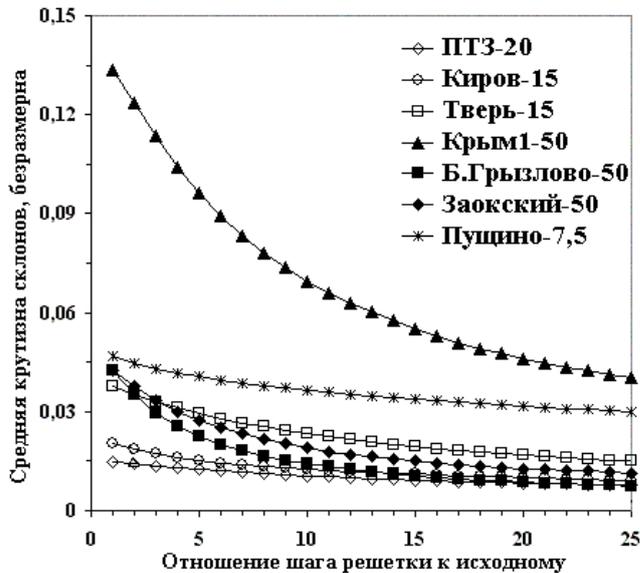


Рисунок 3.19. Зависимость средней по местности крутизны от шага решетки для семи территорий (Shary et al., 2005). Исходный шаг решетки указан после названия местности.

На настоящий момент не существует объективного масштаба (шага решетки), для которого значения крутизны и других МВ были бы «правильными». В работе (Evans, 1975) это названо «основной проблемой геоморфометрии». Как указывал Шарый П.А., за «негладкость» земной поверхности приходится платить зависимостью многих МВ (морфометрическая величина) от масштаба (Shary, 2008).

Это особенно актуально для равнинных территорий, к которым относится территория Архангельской области, т.к. значения геоморфометрических параметров относительно невелики.

Наиболее простыми методами генерализации являются «сглаживание» отрезком или окном. Применяются либо «скользящие» отрезки и окна, либо примыкающие друг к другу. Диссертант сознательно отказался от применения «скользящего» отрезка или окна, т.к. в первом случае происходит смещение центра аномалии рельефа на половину длины отрезка, а во втором – размывание контуров аномалии.

При расчетах в окне 960×960 метров диапазон значений высоты на территории Архангельской области составил [0; 458] метров. В окне 1920×1920 метров – [0; 437]. В окне 30×30 метров (разрешение ASTER

GDEM) – [0; 474]. Также меняется и диапазон значений углов наклона склонов на территории Архангельской области – [0; 4.59] градусов при расчетах в окне 960×960 метров. В окне 1920×1920 метров – [0; 2.71]. В окне 30×30 метров (разрешение ASTER GDEM) – [0; 35.45].

Учитывая то обстоятельство, что высота, угол наклона склонов применяются при расчете большинства геоморфометрических параметров, то при увеличении ячейки («окна») значения этих параметров будут уменьшаться, снижая оценку потенциальной склонности рельефа к развитию эрозионных процессов. В то же время анализ ЦМР с использованием разных окон показал тождественность пространственного распределения высот.

Как указывалось ранее, для уменьшения локальной составляющей нами применялся фильтр сглаживания Smooth из модуля Simple Filter, как наиболее «щадящий» из фильтров в ГИС SAGA.

На растровых ЦМР различного разрешения множество геоморфометрических параметров будут иметь различные значения и, следовательно, выделять различные объекты. Если размер ячейки достаточно мал (несколько см), анализ определит крутые склоны даже на тех участках, которые выглядят абсолютно плоскими (равнины, речные террасы). Как только разрешение растра становится грубее, среднее значение углов наклона уменьшается. Если размер ячейки достаточно большой, склоны на ЦМР будут очень пологими даже на тех участках, где ожидаются большие значения углов наклона (Geomorphometry..., 2009).

Наши расчёты показывают, что на значения геоморфометрических параметров оказывает влияние не только размер ячейки ЦМР, но и ряд других факторов, например, используемые алгоритмы для устранения артефактов, параметры сглаживания ЦМР, методы аппроксимации, – другими словами, весь комплекс работ по разработке ЦМР, начиная от наблюдения и заканчивая исправлением ошибок. Поэтому значения рассчитанных геоморфометрических параметров будут зависеть не только от источника ЦМР (что естественно), но и от работы, проведенной ГИС-

специалистом для подготовки ЦМР к решению определённых задач. Проиллюстрировать это явление можно, рассчитав какой-либо параметр на разных ЦМР одной и той же области (рис. 3.20).

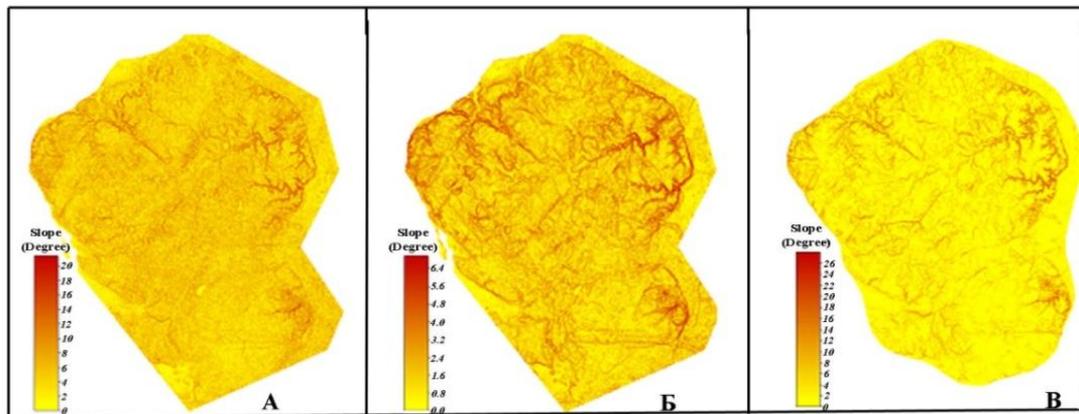


Рисунок 3.20. Расчёт углов наклона на разных ЦМР: А – ASTER GDEMv2 (ячейка 90 м), диапазон значений от 0 до 20⁰; Б – ASTER GDEMv2 (ячейка 500 м), диапазон значений от 0 до 6.4⁰; В – ЦМР, оцифрованная из данных ГИС Панорама (ячейка 90 м), диапазон значений от 0 до 26⁰

На рис. 3.20 видно, как меняются значения определённого геоморфометрического параметра (в данном случае, угла наклона) в зависимости от характеристик ЦМР. Диапазон значений параметра в каждом расчёте разный, хотя параметр рассчитывался для одной и той же территории.

Такое явление затрудняет анализ протекающих на территории эрозионных процессов, так как при количественной оценке геоморфометрических параметров, имея разные значения этих параметров в разных расчётах, возникает ряд вопросов, таких как: это конкретное значение параметра ошибочно или верно; следует ли считать это конкретное значение большим, средним или малым для данной территории; при прогнозировании следует ли считать это значение характеризующим дальнейшее протекание того или иного процесса?

Оценить, верны ли рассчитанные параметры, могут эксперты, знакомые с характеристикой исследуемой территории. Однако в большинстве случаев (например, если источник ЦМР один, но расчёты проведены в разных окнах), абсолютные значения параметров хоть и будут

разными, но характер проявления процесса, описываемого этими параметрами, останется относительно постоянным. Подтвердить это можно, каким-либо образом оценив значения параметра не количественно, а качественно. Воспользовавшись, например, одним из методов классификации и выделив в выборке схожие по значениям классы, можно апеллировать не абсолютными значениями (в которых могут быть расхождения), а категориями значений (которые сохраняют относительное постоянство). Один из таких методов классификации – это кластерный анализ (рис. 3.21).

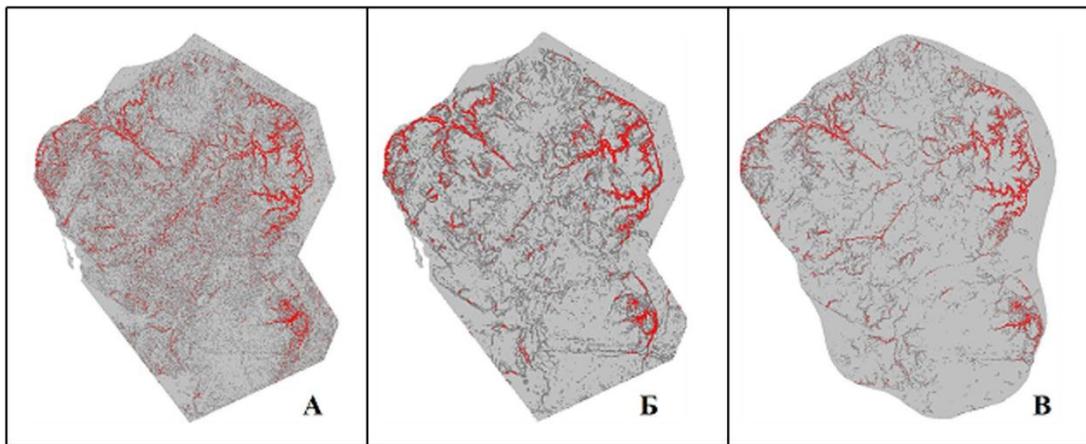


Рисунок 3.21. Классы углов наклона на разных ЦМР:

А – ASTER GDEMv2 (ячейка 90 м); Б – ASTER GDEMv2 (ячейка 500 м); В – ЦМР, оцифрованная из данных ГИС Панорама (ячейка 90 м)

На рис. 3.21 показаны те же расчёты, что и на рис. 3.20, но значения отображены не в абсолютных величинах, а с помощью классов. Красным обозначен класс, в который попали высокие значения угла наклона, этот класс можно назвать «крутые для этой конкретной территории склоны». Для рис. 3.21А диапазон значений этого класса составил [5; 20], для рис. 3.21Б – [2; 6.4], для рис. 3.21В – [5; 26]. Хотя абсолютные значения внутри классов достаточно разные, а сами классы характеризуют те же самые склоны.

3.3.1 Кластерный анализ

Кластерный анализ подразумевает деление набора данных на непересекающиеся группы (кластеры, классы) точек, при котором значения

точек в одном кластере «более схожи» друг с другом, чем со значениями точек из другого кластера. Термин «более схожи» здесь означает степень близости по какой-либо метрике. Когда набор данных разбит на кластеры, каждая точка в нем принадлежит какому-либо кластеру, а каждый кластер характеризуется каким-либо значением (обычно средним значением внутри кластера) (Faber, 1994). В большинстве случаев кластерный анализ применяется, когда нет каких-либо определенных гипотез относительно распределения имеющихся данных на группы или когда необходимо проверить гипотезу о классификации наблюдаемых данных (<http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stcluan.html>).

Наиболее популярный для геоморфометрического анализа метод кластеризации k-means (k-средних) основан на итеративном перемещении значений между кластерами. Он чаще служит как способ количественной и качественной оценки набора данных, чем как способ деления набора на уникальные, конечные группы (рис. 3.22). Еще одна роль метода k-средних – это снижение сложности данных (Morissette, Chartier, 2013).

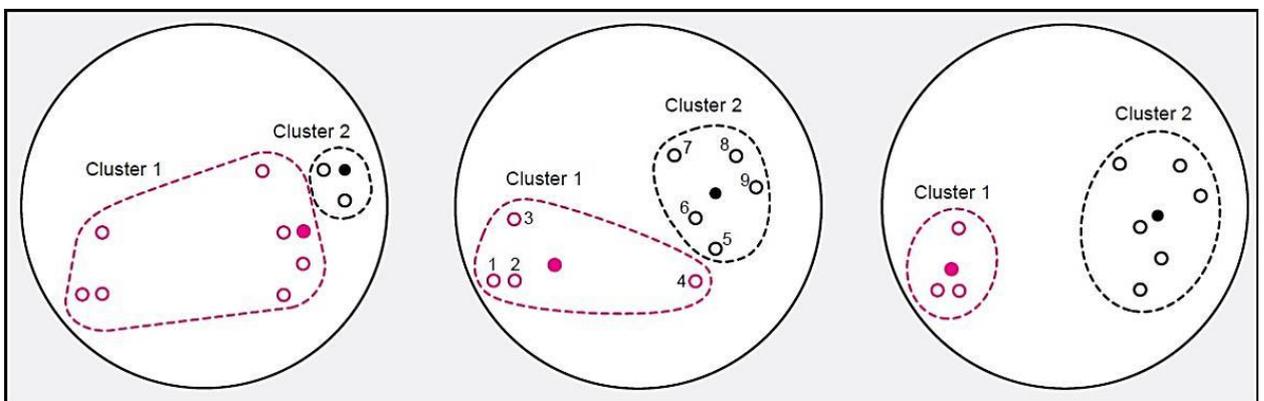


Рисунок 3.22. Пример работы метода кластеризации k-means

Существует несколько алгоритмов реализации метода k-средних. В общем случае алгоритм состоит из следующих шагов (Komarasamy, Wahi, 2013): 1) выбрать начальные центры k кластеров; 2) соотнести каждый элемент выборки с ближайшим центром кластера; 3) вычислить новые значения центров каждого кластера, исходя из деления, произведенного на предыдущем шаге; 4) Повторять шаги 2 и 3 до тех пор, пока деление не

стабилизируется, то есть закончить, когда классификация будет оставаться постоянной на каждой последующей итерации.

Другими словами, для множества точек $[x_1, x_2, \dots, x_n] \in R$ метод k -средних пытается отыскать множество центров кластеров $[c_1, c_2, \dots, c_k] \in R$ так, чтобы было минимальным суммарное отклонение точек от центров своих кластеров:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n dist(c_i, x_{ij}), \quad (3.17)$$

где k – количество кластеров,

n – количество точек,

$dist$ – метрика близости.

В SAGA GIS используется алгоритм метода k -средних автора Forgy, использующий другую формулу (Morissette, Chartier, 2013):

$$\sum_{i=1}^k \int p(x) dist(c_i, x_{ij}) dx, \quad (3.18)$$

где $p(x)$ – функция плотности вероятности, причем если она неизвестна, то вычисляется на основе набора данных, $dist$ – метрика близости, в данном случае используется минимальное расстояние.

В алгоритме Forgy начальные центры кластеров выбираются случайным образом.

Выбор начальных центров зависит от конкретной реализации алгоритма, например, начальные центры могут быть указаны пользователем программного обеспечения или выбраны программой случайно. В SAGA GIS применяется также метод hill climbing (поиск «восхождением к вершине»), целью которого является поиск локальных минимумов или максимумов путем сравнения текущего значения с соседними значениями. Первое значение выбирается случайно и помечается как текущее. На последующих итерациях текущее значение сравнивается с возможными соседними значениями и если среди соседних значений находится более оптимальное, то оно помечается как текущее. Цикл продолжается до тех пор, пока у

текущего значения не будет таких лучших соседей (т.е. больших или меньших в зависимости от цели сравнения).

Рассмотрим пример выполнения кластерного анализа на имитационной ЦМР и реальной ЦМР (рис. 3.23).

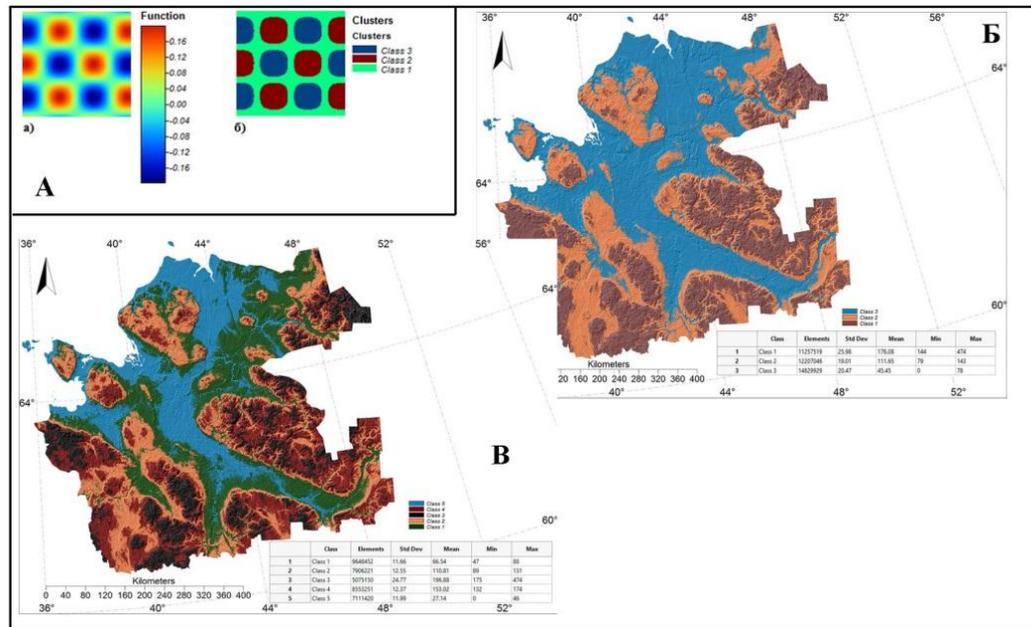


Рисунок 3.23. Пример выполнения кластерного анализа на имитационной и реальной ЦМР

А – кластерный анализ имитационной ЦМР: а) ЦМР, созданная с помощью функции $z = \sin(x)\cos(x)$; б) три кластера; Б – кластерный анализ подготовленной ЦМР с разбиением на 3 класса; В – кластерный анализ подготовленной ЦМР с разбиением на 5 классов

На рисунке 3.23А видно, что при выполнении кластерного анализа было выбрано количество кластеров, равное 3. При этом анализ выделил в отдельные кластеры зоны понижений, зоны повышений и плоские зоны. Кластерный анализ в SAGA GIS позволяет получить статистику по каждому кластеру (таб. 3.6).

Таким образом, применение кластерного анализа для обработки ЦМР и геоморфометрических параметров позволяет получать статистические данные по классам, не теряя информации, как при использовании разноразмерных ячеек. Сопоставление ЦМР в разных ячейках с ЦМР рассчитанными при помощи кластерного анализа (рис. 3.23Б, В) показывает,

что в последнем случае выделение не только общего тренда, но и границ проявления эрозионных процессов более наглядно и корректно.

Таблица 3.6 Статистика кластеров имитационной ЦМР

Кластер	Min	Max	Mean	StdDev	%
1	-0.064337	0.064312	-0.000009	0.032603	47.83
2	0.064315	0.200000	0.128638	0.039846	26.07
3	-0.200000	-0.064340	-0.128669	0.039842	26.09

Под кластерным анализом понимается набор различных алгоритмов кластеризации. Целью выполнения кластерного анализа является организация набора данных в наглядные структуры (классы, кластеры)

В силу того, что ЦМР Архангельской области имеет довольно большую плотность ячеек (например, при размере ячейки около 90×90 м общее количество ячеек составляет 38353232), любые выделяемые с помощью кластерного анализа зоны, характеризующиеся порядком значений того или иного геоморфометрического параметра, имеют прерывистые или сильно «раздробленные» контуры. Один из способов объединить контуры – это генерализация данных. Генерализация неизбежно ведет к потерям локальных данных, но при исследованиях крупных территорий этими потерями можно в какой-то степени пренебречь и приписать их к несущественным деталям, оставляя в рассмотрении только основные, характерные всему региону особенности. Имея на руках исходный материал, эти детали всегда можно восстановить, переходя от изучения региональных особенностей к локальным.

Сама процедура генерализации при кластерном анализе состоит из нескольких шагов:

1. Выбор окна усреднения: размер этого окна зависит от площади исследуемой территории, чем больше площадь, тем большее окно можно позволить себе выбрать. Для ЦМР Архангельской области, с учетом результатов анализа гидросети региона (Кутинов, Чистова, 2004), было выбрано окно 10 км.

2. Сглаживание усредненных данных к исходному размеру ячейку билинейным сплайном. После такой процедуры, выделяемые с помощью кластерного анализа зоны, имеют гладкие, визуально определяемые границы (рис. 3.24).

Для геоэкологического районирования, после проведения кластерного анализа значений геоморфометрических параметров будут получены контуры, разделяющие область исследования на области, отличающиеся по интенсивности протекания природных процессов.

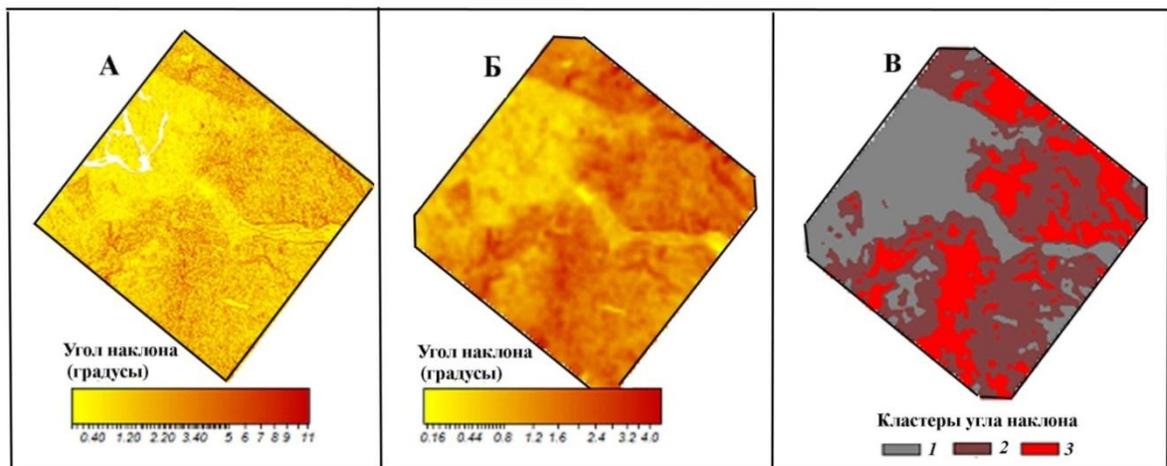


Рисунок 3.24. Результат кластерного анализа углов наклона, построенный после генерализации данных: А – исходные значения угла наклона; Б – значения угла наклона после генерализации; В – три кластера значений угла наклона

Второй этап заключался в нахождении общих границ контуров, соответствующих максимальным, средним и минимальным кластерам значений параметров (рис. 3.25). Например, стоит задача найти общую границу трех контуров: А (максимальные значения угла наклона); В (максимальные значения LS-фактора); С (максимальные значения индекса расчлененности). Тогда можно представить эти контуры в виде множеств и вычислить их пересечение $A \cap B \cap C$. В данной работе средствами ГИС это выполнялось векторизацией растровых областей в полигоны и вычислением пересечения полигонов.

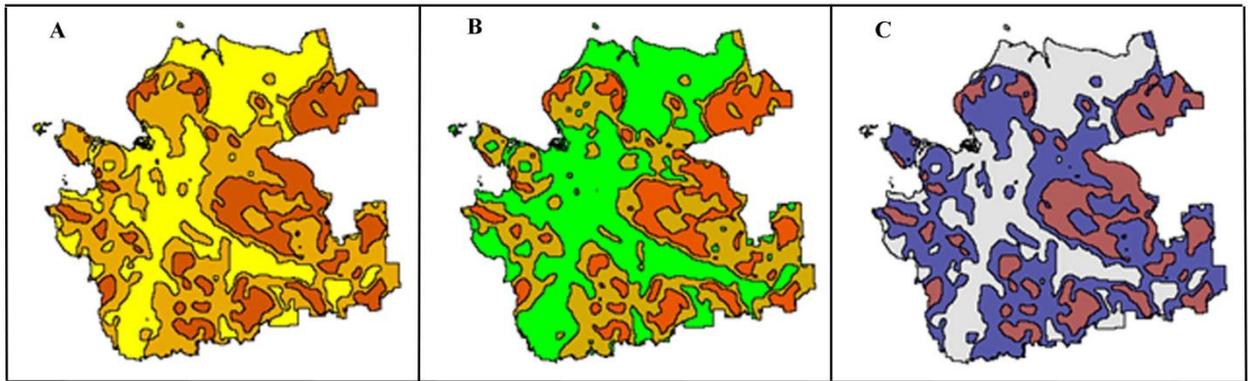


Рисунок 3.25. Пример кластерного анализа значений: А – углов наклона; В – LS-фактора; С – индекса расчлененности

В данном исследовании выполнялась векторизация растровых областей в полигоны в ПО SAGA GIS модулем *Vectorising Grid Classes* (преобразует растровые кластеры в полигоны). Затем вычислялись пересечения полигонов модулем *Intersect* по алгоритму (Vatti, 1992), создавались объединенные полигоны минимальных, средних и максимальных кластерных значений угла наклона, LS фактора и индекса расчлененности рельефа (рис.3.26).

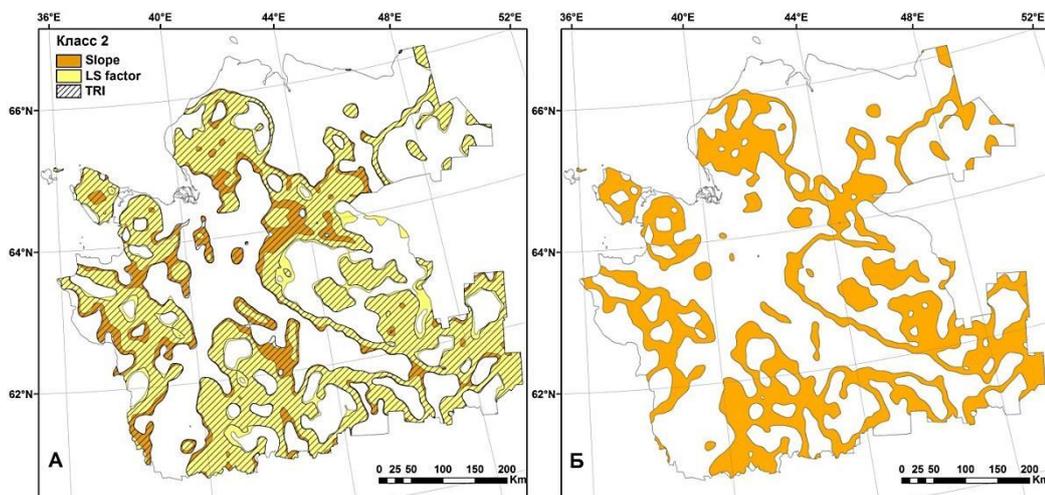


Рисунок 3.26. Пример пересечения полигонов средних значений угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа (А) и объединенный полигон средних значений (Б)

ГЛАВА 4 ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Анализ принципов и приемов геоэкологических исследований показал, что в их основе лежит, как правило, учет антропогенного воздействия и практически отсутствует анализ природного состояния окружающей среды, в первую очередь, геологической (Кутинов, 2005).

Комплексность изучения предполагает соответствующее исходное определение сути земной поверхности, в котором органическим образом должны быть объединены все компоненты этой поверхности, в совокупности составляющие природную или окружающую среду (Кутинов, 2005). С этой точки зрения земную поверхность необходимо рассматривать как результат последовательного сложения геологических структур (разной природы, различной глубины заложения и объема, охваченных ими слоев литосферы), закономерно преобразованных комплексом экзогенных процессов и соответствующим образом проявленных в рельефе. В этом определении земная поверхность выступает, во-первых, как категория историческая и, во-вторых, как результат взаимодействия литосферы (эндогенных процессов) с гидросферой, атмосферой и биосферой и источниками внешнего воздействия (экзогенными или внешними процессами). В ряду внешних процессов принципиальное место принадлежит техногенным нагрузкам на природную среду, связанным деятельностью человека как одного из компонентов биосферы.

Рельеф является одним из основных факторов, определяющих ход и направленность процессов, протекающих в приповерхностном слое планеты. Большинство эколого-геохимических процессов зависит от поступления в каждую точку пространства влаги и солнечной энергии, их распределение регулируется углами наклона и экспозицией склонов.

4.1 Районирование территории на основе кластерного анализа углов наклона, LS-фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности

Районирование выполнялось в 6 этапов. На первом этапе был проведен кластерный анализ значений трех параметров (угол наклона, LS-фактор, индекс расчлененности) с использованием трех кластеров по каждому из параметров.

В целом, значения углов наклона рельефа определяют степень эродированности пород; LS-фактор – влияние длины и крутизны склона на эрозию почвы; индекс расчлененности – изрезанность рельефа (среднеквадратичный перепад высот).

Таким образом, на первом этапе были получены контуры, разделяющие область исследования на три части: максимальные, средние и минимальные значения каждого из параметров (рис. 3.25).

Второй этап заключался в нахождении общих границ контуров, соответствующих максимальным, средним и минимальным кластерам значений параметров. Например, стоит задача найти общую границу трех контуров: А (максимальные значения угла наклона); В (максимальные значения LS-фактора); С (максимальные значения индекса расчлененности). Тогда можно представить эти контуры в виде множеств и вычислить их пересечение $A \cap B \cap C$. В данной работе средствами ГИС это выполнялось векторизацией растровых областей в полигоны и вычислением пересечения полигонов (рис. 3.26).

На третьем этапе зона объединенных контуров минимальных значений параметров делилась на две части по степени увлажнения. Для этого сначала были посчитаны 5 кластеров значений индекса влажности. В результате анализа были выделены две основных области: 1) предрасположенные к подтоплению территории во время паводков, 2) склонные к заболачиванию (рис. 4.1).

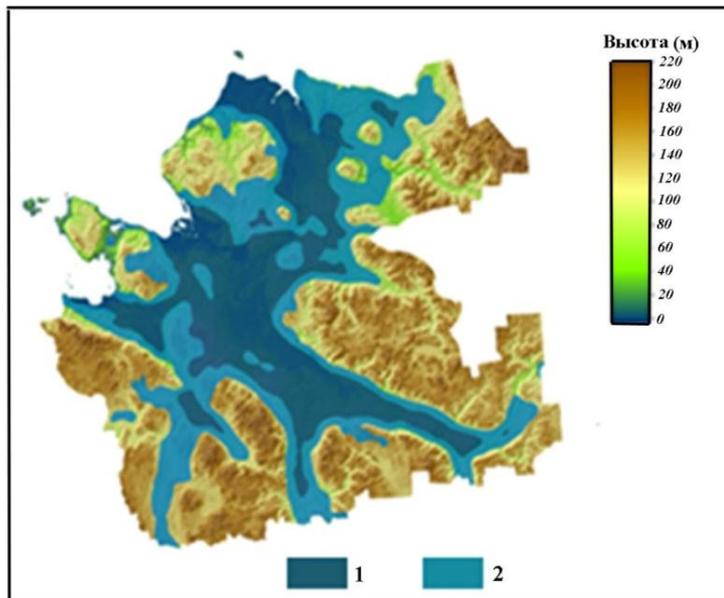


Рисунок 4.1. Районирование территории Архангельской области по степени увлажнения согласно значениям индекса влажности: 1) области, предрасположенные к подтоплению территории во время паводков; 2) области, склонные к заболачиванию

На четвертом этапе с помощью кластерного анализа значений плотности бессточных впадин (рис. 4.2 и 4.3, табл. 4.1) была выделена секущая зона, совпадающая с областью распространения карстующихся пород (Шаврина и др., 2007). Эта зона выделяется по кластеру повышенной плотности бессточных впадин (рис. 4.3).

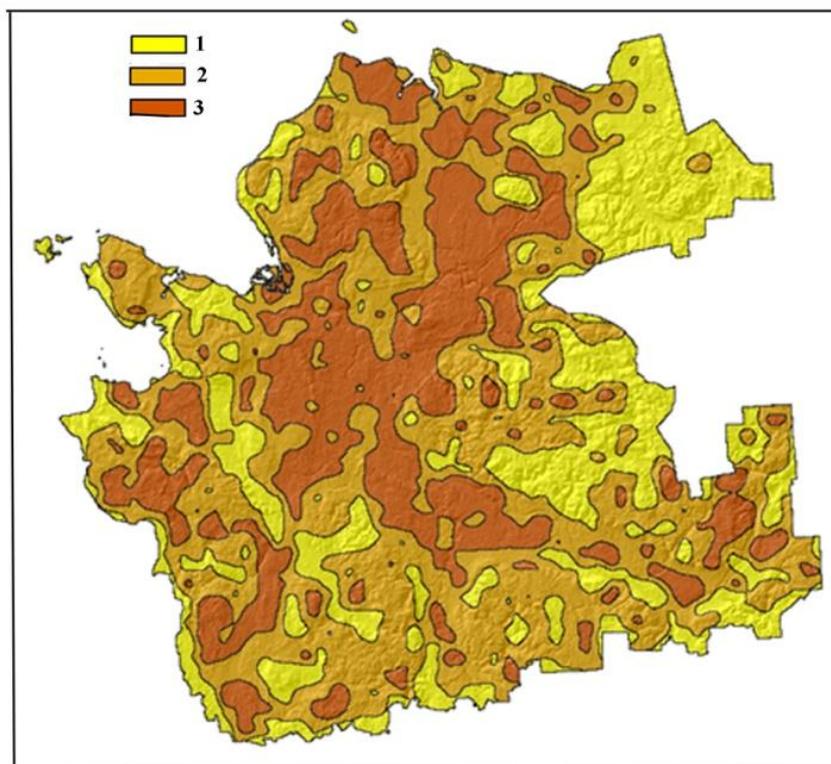


Рисунок 4.2. Кластеры плотности впадин
1 – кластер 1 (минимальные значения); 2 – кластер 2 (средние значения); кластер 3 – (максимальные значения)

Таблица 4.1 – Характеристики кластеров плотности впадин

Кластер	Доля, %	Среднее арифметическое, впадин/км ²	Стандартное отклонение, впадин/км ²
Кластер 1	27,55	0,82	0,21
Кластер 2	44,95	1,35	0,14
Кластер 3	27,50	1,86	0,20

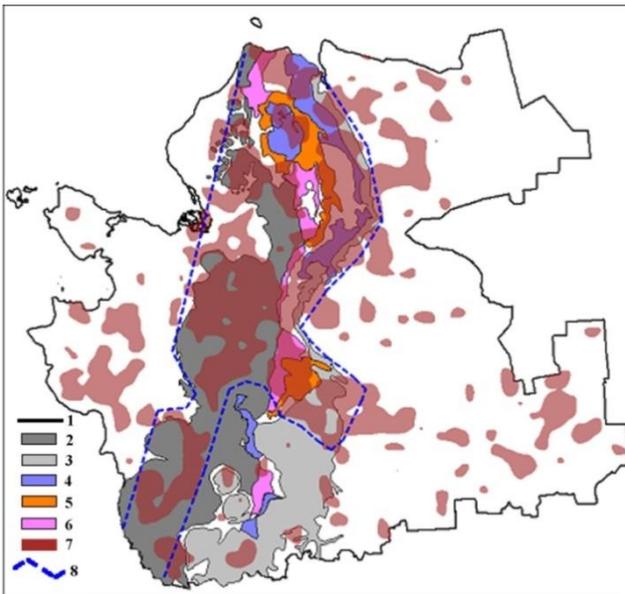


Рисунок 4.3. Секущая зона карстующихся пород

1 – граница Архангельской области; 2 – карбонатная формация $C_{2m}-P_{1s}$; 3 – карбонатная формация P_{2kz_2} ; 4 – карбонатно-терригенная формация P_{2kz_1} ; 5 – терригенно-сульфатная формация P_{2u} ; 6 – сульфатно-карбонатная формация, сульфатная субформация P_{1s} ; 7 – кластер повышенной плотности впадин; 8 – секущая зона карстующихся пород

На пятом этапе по каждой из полученных зон районирования (рис. 4.4А) были посчитаны средние значения различных геоморфометрических параметров (табл. 4.2) для того, чтобы можно было дать характеристику протекающих в каждой из зон процессов.

Таблица 4.2 Средние значения геоморфометрических параметров

Параметр / Зона	Зона I (34,80%)		Зона II (33,03%)		Зона III (18,16%)	
	μ	δ	μ	δ	μ	δ
Высота, метры	66,47	44,41	123,41	51,70	143,92	47,09
Угол наклона, градусы	0,58	0,43	0,96	0,65	1,44	0,96
Индекс расчлененности	0,61	0,42	0,99	0,63	1,48	0,94
LS-фактор	0,29	0,30	0,59	0,59	1,08	1,04
Индекс мощности линейной эрозии, $\times 10^4$	8,66	240,12	12,20	276,36	17,11	256,97
Индекс влажности	15,39	0,68	14,51	0,67	13,84	0,68
Прямая инсоляция, кВт/м ²	160,00	1,04	160,52	1,87	160,68	3,07
Рассеянная инсоляция, кВт/м ²	48,57	0,39	49,07	0,46	49,25	0,43
ФАР, кВт/м ²	96,34	0,57	96,86	0,90	97,04	1,35

μ – среднее арифметическое значение, δ – среднеквадратическое отклонение

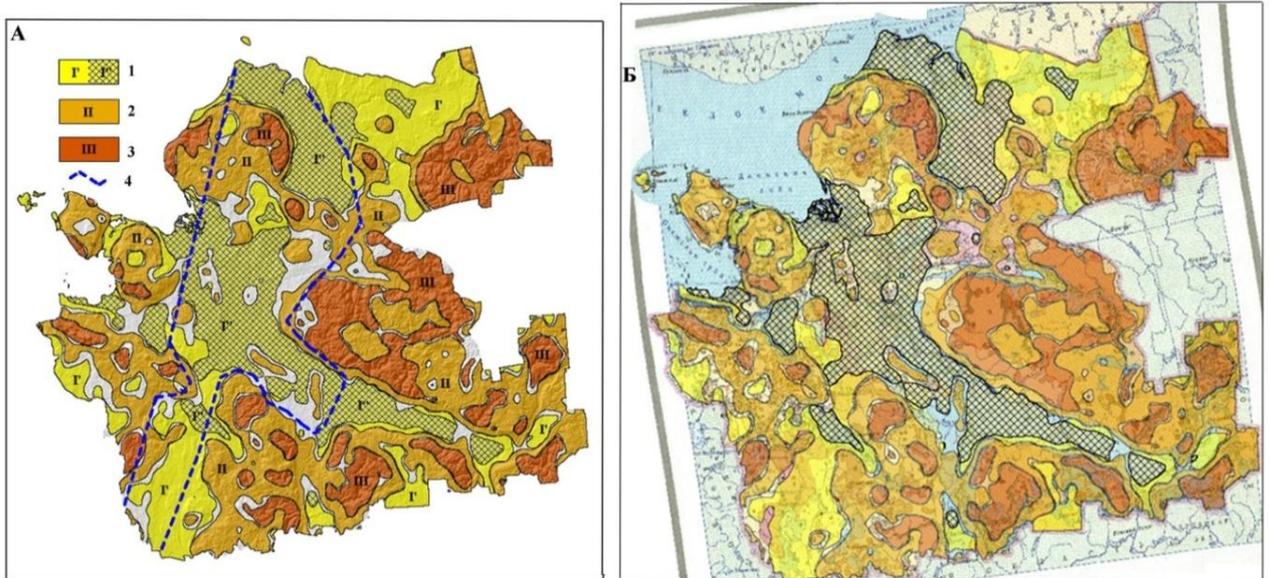


Рисунок 4.4. Схема сопоставления материалов

А – Районирование территории Архангельской области на основе кластерного анализа значений углов наклона, LS-фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности 1 – Зона I: озерно-ледниковые и озерные равнины, предрасположенные к аккумулятивным процессам и Г' – склонные к заболачиванию; Г – к подтоплению во время паводков; 2 – зона II: плоские и волнистые моренные равнины, слабо предрасположенные к развитию эрозионных процессов; 3 – зона III: плоские и волнистые моренные равнины, абрадируемые ледниковыми и морскими водами, пересекающиеся холмистым и холмисто-грядовым моренным и холмисто-котловинным камовым (с развитием карста) типами рельефа, сильно предрасположенные к развитию эрозионных процессов; 4 – секущая зона карстующихся пород; Б – сопоставление с геоморфологической картой Архангельской области (Атлас..., 1976)

На шестом этапе полученная карта районирования сравнивалась с геоморфологической картой Архангельской области (рис. 4.4Б).

Следует отметить, что данные полученные в результате геоморфометрического анализа позволяют дать характеристики региона с несколько иных позиций, чем при геоморфологическом районировании.

Полученная карта геоэкологического районирования (на основе расчета геоморфометрических параметров рельефа) позволяет в отличие от геоморфологической карты дать характеристики не только рельефа, но и предрасположенности выделенных районов к развитию тех или иных эрозионных процессов (таблица 4.3).

Таблица 4.3. Характеристика зон

Зона	Геоморфология (рисунок 4.4Б)	Геморфометрия (рисунок 4.4А)
I	<p>На юго-востоке области этой зоне характерен водно-ледниковый и озерный аккумулятивный тип рельефа – это озерно-ледниковая и озерная равнины.</p> <p>На северо-востоке области этой зоне помимо водно-ледникового и озерного аккумулятивного типа рельефа характерны также структурно-денудационный (пластовый) – это крупноволнистые равнины на горизонтально лежащих палеозойских осадочных породах с маломощным покровом (морены); и ледниковый аккумулятивный – это плоские и волнистые моренные равнины, местами абрадируемые ледниковыми и морскими водами. На северо-западе и юго-западе области водно-ледниковый аккумулятивный тип рельефа представлен также холмисто-котловинным камовым рельефом.</p>	<p>Это территории, предрасположенные к заболачиванию и накоплению осадков: низины, низкие земли, поймы крупных рек с террасами, на Севере – приморские равнины и террасы морского генезиса.</p> <p>Этой зоне характерны пониженные, наиболее увлажненные и наименее прогретые (судя по инсоляции) территории, не предрасположенные к развитию эрозионных процессов (минимальные значения угла наклона, LS-фактора и индекса расчлененности, а также индекса мощности линейной эрозии).</p>
II	<p>На юго-востоке области этой зоне характерен ледниковый аккумулятивный тип рельефа – это плоская и волнистая моренная равнина, местами абрадируемая ледниковыми и морскими водами, а также холмистый и холмисто-грядовый моренный рельеф.</p> <p>На северо-востоке области этой зоне характерен структурно-денудационный (пластовый рельеф) – это крупноволнистые равнины на горизонтально лежащих палеозойских осадочных породах с маломощным покровом (водно-ледниковых). На северо-западе и юго-западе области этой зоне характерен ледниковый аккумулятивный тип рельефа – это плоская и волнистая моренная равнина, местами абрадируемая ледниковыми и морскими водами, а также холмистый и холмисто-грядовый моренный рельеф.</p>	<p>Это территории, служащие источниками материала (плато, плоская, но возвышенная территория), местами слабохолмистые, местами бронированные известняками.</p> <p>Этой зоне характерны умеренно увлажненные и умеренно прогретые (судя по инсоляции) территории средних высот, слабо предрасположенные к развитию эрозионных процессов (средние значения угла наклона, LS-фактора и индекса расчлененности, а также индекса мощности линейной эрозии).</p>
III	<p>На юго-востоке, юге и юго-западе области этой зоне характерен ледниковый аккумулятивный тип рельефа – это плоская и волнистая моренная равнина, местами абрадируемая ледниковыми и морскими водами, а также холмистый и холмисто-грядовый моренный рельеф.</p> <p>На северо-востоке этой зоне наряду с ледниковым аккумулятивным типом рельефа наблюдается денудационный (цокольный) – это возвышенная волнистая равнина на сильнодислоцированных метаморфических породах рифея с маломощным покровом элювиально-делювиальных отложений. На северо-западе области в этой зоне наблюдается <u>холмисто-котловинный камовый рельеф (форма рельефа – карст)</u>.</p>	<p>Это территории максимального развития эрозионных процессов (крупные изрезанные склоны).</p> <p>Этой зоне характерны повышенные, наименее увлажненные и наиболее прогретые (судя по инсоляции) территории, сильно предрасположенные к развитию эрозионных процессов (максимальные значения угла наклона, LS-фактора и индекса расчлененности, а также индекса мощности линейной эрозии).</p>

Отдельным вопросом является характеристика зоны карстующихся пород. Обычно под этим термином понимается область распространения горных пород, растворимых природными поверхностными и подземными водами: известняки, доломиты, гипсы, ангидриты, каменные и калийные соли. Авторы (Шаврина и др., 2007), выделившие эту зону, под этим термином подразумевали область распространения пород, по своему литологическому составу предрасположенных к развитию карстовых процессов, без выделения зон развития карста. Анализ пространственного распределения плотности бессточных впадин показал, что достаточно отчетливо выделяются участки, приуроченные к развитию сульфатно-карбонатных и терригенно-сульфатных формаций пермского возраста (повышенная плотность впадин). Среди литологических типов карста сульфатный карст выделяется высокой активностью протекающих процессов. Здесь встречаются как обычные для равнинных и горных карстовых областей формы поверхностного карста (карры, рвы, цирки, воронки, западины, котловины, овраги, суходолы), так и редкие уникальные формы, присущие только северному карсту (лога, шелошняки и шелошняковые поля, останцы, башни, польеобразные депрессии) (Шаврина, 2002; Шаврина и др., 2007). В целом, процессы носят локальный характер, при этом емкость впадин невысока. Значения глубин впадин от 1 до 21 м, доминирующей является глубина 1 м (45 %), глубины 1-5 м занимают 81 % от всей выборки. Учитывая пространственное совпадение бессточных впадин с флексурными перегибами в осадочном чехле и областью развития карстующихся пород можно предположить, что здесь будет преобладать вертикальная миграция вещества (Минеев и др., 2017).

Кроме геоморфологии было проведено сопоставление с почвами, ландшафтами, геологическим строением, картой четвертичных отложений, геохимией, неотектоникой, пространственным распределением карстовых процессов. В целом, каждая из выделенных диссертантом зон отражается в вышеперечисленных материалах и характеризуется определенным набором

геоморфологических, геологических, почвенных, ландшафтных, геохимических и тектонических параметров (табл. 4.4). Примеры сопоставления показаны на рисунках 4.5 и 4.6.

Таблица 4.4 Сопоставление материалов с выделенными зонами

	Зона I' (заболачивания)	Зона I'' (подтопления во время паводков)	Зона II (слабо предрасположенные к развитию эрозионных процессов)	Зона III (сильно предрасположенные к развитию эрозионных процессов)
Почвы	Полугидроморфные почвы временного избыточного увлажнения, почвы тундровой зоны	Гидроморфные почвы постоянного избыточного увлажнения, аллювиальные почвы речных долин и морских отложения	Полугидроморфные почвы временного избыточного увлажнения	Почвы таежной зоны нормального и кратковременного избыточного увлажнения
Ландшафты	Плоские, преимущественно низменные, заболоченные равнины и впадины: озерно-ледниковые	Болота: таежные верховые, грядово-мочажинные лесотундровые и крайне северотаежные приморские	Междуречные (плакорные) равнины, возвышенные на маломощной валдайской карбонатной морене	Междуречные (плакорные) равнины, возвышенные на московской, преимущественно на бескарбонатной суглинистой морене
Геоморфология	Озерно-ледниковые и озерные равнины, склонные к заболачиванию	Озерно-ледниковые и озерные равнины, склонные к подтоплению во время паводков	Плоская и волнистая моренная равнина, местами абрадируемая ледниковыми и морскими водами, холмистый и холмисто-грядовый моренный рельеф	Плоская и волнистая моренная равнина, местами абрадируемая ледниковыми и морскими водами, а также холмистый и холмисто-грядовый моренный рельеф.
Четвертичные отложения	Верхнечетвертичные отложения (III): озерно-ледниковые	Верхнечетвертичные и современные отложения (III-IV): озерно-ледниковые и озерные	Верхнечетвертичные отложения (III): ледниковые	Среднечетвертичные отложения (II): флювиогляциальные

Таблица 4.4 - Продолжение

Геохимия	Нет данных	Нет данных	Аномалии кимберлитовых элементов 1-го порядка	Аномалии кимберлитовых элементов 2-го порядка
Тектоника	Мурманский геоблок	Беломорский блок. Балтийско-Мезенская венд-палеозойская трансблоковая зона	Рифейские грабены	Рифейские грабены. Вельско-Цильменская мезозойская разломно-блоковая зона
Неотектоника	Нет данных	Нет данных	Структуры первого порядка, развитие палеодолин	Структуры первого порядка
Современная тектоника	Повышенные значения индекса влажности, пониженные значения LS-фактора и индекса расчлененности рельефа	Активный на современном этапе Кандалакшский грабен, миграция очагов землетрясений. Повышенные значения индекса влажности, пониженные значения LS-фактора и индекса расчлененности рельефа	Область развития открытого карста, современное воздымание Беломорско-Кулойского плато. Повышенные значения LS-фактора и индекса расчлененности рельефа	Область развития погребенного карста, граница последнего оледенения. Повышенные значения LS-фактора и индекса расчлененности рельефа

Таким образом, по геоморфометрическим параметрам выделены геоэкологические районы (зоны), отличающиеся однотипными процессами, отражающими геолого-геоморфологическое строение и геодинамический режим территории (примеры на рис. 4.5; 4.6). Следует отметить, что эти зоны имеют генерализованный характер, и наблюдаются некоторые перекрытия, особенно в граничных районах. В то же время, анализ монофакторных карт геоморфометрических параметров, использованных диссертантом для геоэкологического районирования территории, показал, что последние достаточно точно картируют эрозионно-аккумулятивные процессы и

отражают геолого-геоморфологическое строение и геодинамический режим. Так неотектоника выделяется в картах индекса расчлененности, современная тектоника в плотности бессточных впадин (зона развития карстовых процессов), анализ карты геохимических аномалий, перспективных на обнаружение кимберлитов, показал, что они совпадают с тектоническими узлами. С последними также совпадают кимберлитовые районы и районы перспективные на обнаружения нефти и газа (Кутинов и др., 2019). Причем перспективные узлы выделяются по геоморфометрическим параметрам.

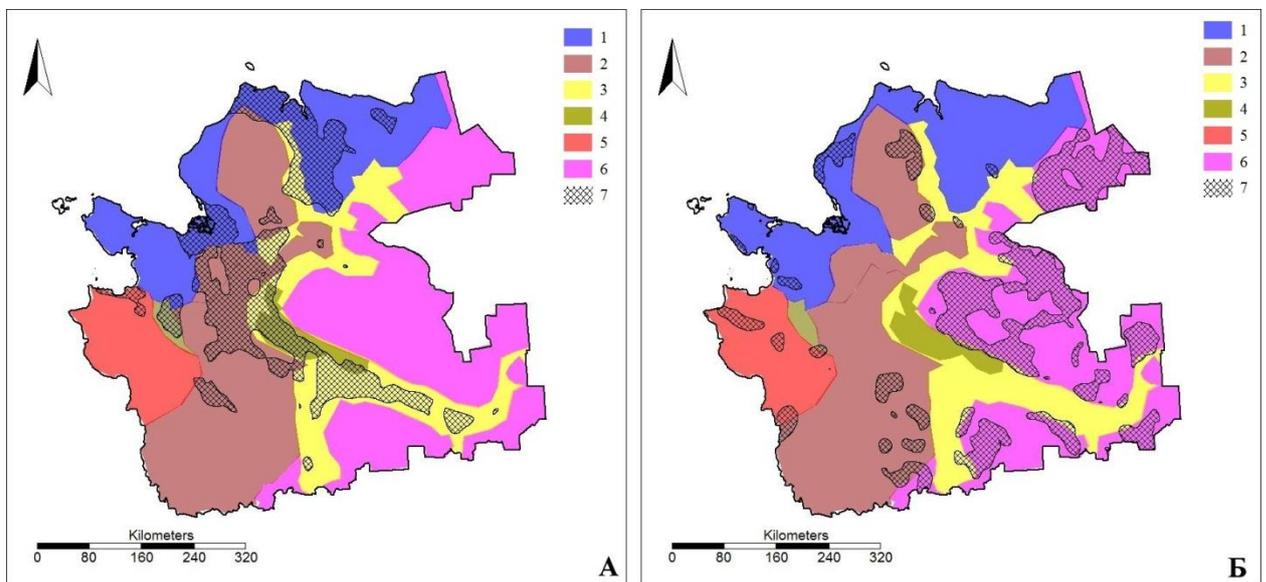


Рисунок 4.5 – Сопоставление зон геоэкологического районирования со схемой ландшафтов

Междуречные (плакорные) равнины с нормальным или кратковременно-избыточным увлажнением: 1 – низменные на валдайской суглинистой морене; 2 – возвышенные на маломощной валдайской карбонатной морене, подстилаемой известняками, доломитами, гипсами, часто с карстом; 3 – низменные озерно-ледниковые песчаные; 4 – низменные озерно-ледниковые глинистые и суглинистые; 5 – низменные на валдайской суглинистой морене, местами всхолмленные; 6 – возвышенные на московской, преимущественно бескарбонатной суглинистой морене.

Болота: 4 – таежные верховые.

Зоны районирования: 7А – Зона Г' (подтопления во время паводков); 7Б – Зона III (территории, сильно предрасположенные к развитию эрозионных процессов).

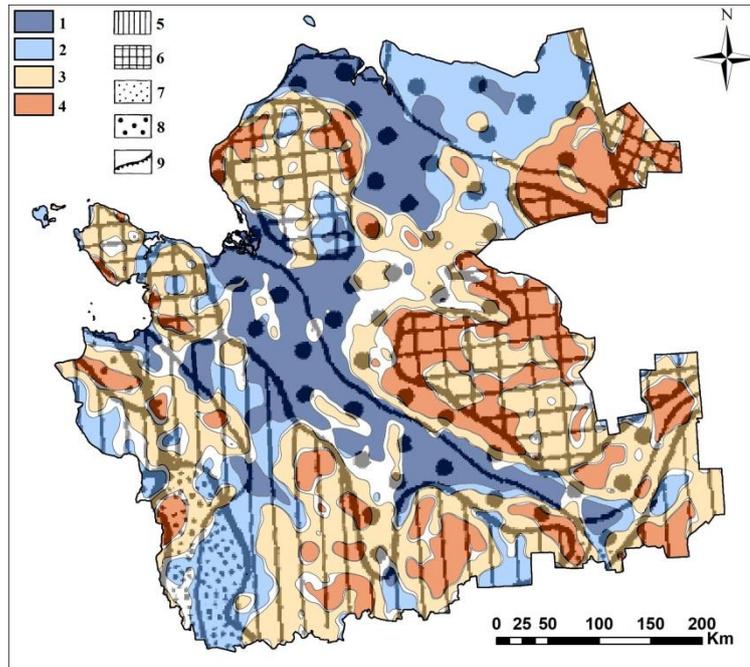


Рисунок 4.6 – Сопоставление зон геозологического районирования с орографической схемой

1 – Зона Г'' (подтопления во время паводков); 2 – Зона Г' (заболачивания); 3 – Зона II (территории, слабо предрасположенные к развитию эрозионных процессов); 4 – Зона III (территории, сильно предрасположенные к развитию эрозионных процессов).

5-6 – средняя высота возвышенностей (м над уровнем моря): 5) $\geq 140-180$; 6) ≤ 140 ; 7-8 – средняя высота низменностей (м): 7) $\geq 60-100$; 8) ≤ 60 ; 9 – граница между Фенноскандией и Русской равниной.

Таким образом, в пределах Архангельской области по геоморфометрическим параметрам выделены геозологические районы, отличающиеся однотипными эрозионно-аккумулятивными процессами, отражающие геолого-геоморфологическое строение и геодинамический режим региона (третье защищаемое положение).

ГЛАВА 5 РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫЕ УЧАСТКИ ДЛЯ НАЗЕМНОГО МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Основными источниками загрязнения Архангельской области на глобальном уровне являются: Европейский центр дестабилизации окружающей среды и Кольский промышленный узел.

Трансграничные атмосферные и водные переносы загрязняющих веществ имеют наибольшее значение для российской Арктики, в первую очередь потому, что регион выступает в большей степени реципиентом трансграничного загрязнения, чем донором. За счет тропосферного переноса северные регионы РФ становятся областью глобального выпадения загрязняющих веществ, накапливаемых за счет атмосферных выбросов индустриально развитых стран Западной Европы, Северной Америки и Азии.

Немаловажное значение имеют население соседних территорий, и характерные им типы хозяйствования. Европейский Север России граничит с Европейским центром дестабилизации окружающей среды (Лосев, 2001). Последний включает в себя Западную, Центральную и Восточную Европу (в т.ч., республики бывшего СССР), часть Скандинавии и значительную часть Европейской территории России. Здесь полностью разрушены или антропогенно изменены лесные экосистемы всех биографических провинций, и сохранилось не более 8% естественных экосистем (Hannah et al., 1994). На западной границе Европейской части России имеет место скачок плотности населения в сопредельных странах, по крайней мере, на порядок (Лосев, 2001). Следствием этих особенностей является повышенный трансграничный перенос загрязняющих веществ из индустриально развитых районов Центральной Европы на территорию Европейского Севера России.

Химическое загрязнение в Арктике принимает глобальные масштабы в связи с низкой ассимиляционной способностью ее морских и сухопутных экосистем и биоты. Практически повсеместно в почвах, растениях и животных, в воде и снеге, морских льдах, донных отложениях растет

концентрация тяжелых металлов. Более 30% загрязненных сточных вод попадает в водную среду региона. Многие участки акватории Баренцева, Белого и Карского морей имеют концентрацию загрязняющих веществ, в 2-3 раза превышающую ПДК. Среди импактных районов, имеющих наиболее высокие уровни загрязнения, выделяются Кольский залив, Печорское море и низовья р. Печоры.

На региональном уровне источниками загрязняющих веществ являются Архангельская и Котласская промышленные агломерации, военно-морской полигон «Ненокса», космодром «Плесецк», крупные объекты лесохимической отрасли, в том числе 3 крупнейших ЦБК, освоение месторождений полезных ископаемых, интенсивная эксплуатация лесных ресурсов с их последующей переработкой и многое другое. Основной тип переноса загрязнения – атмосферный с жидкими и твердыми (снеговыми) осадками. В дальнейшем происходит перераспределение загрязняющих веществ в зависимости от характера эрозионных процессов и форм рельефа.

Поверхность дневного рельефа изучаемого региона представляет собой сочетание крупных возвышенностей, разделенных глубокими и протяженными впадинами, к которым обычно приурочены долины крупных рек, таких как Онега, Северная Двина, Вага, Пинега, Мезень, которые на региональном уровне являются основными зонами тразита и аккумуляции осадков. Поэтому было необходимо провести бассейновое районирование территории для геоэкологической оценки водосборных площадей.

5.1 Бассейновое районирование территории для геоэкологической оценки водосборных площадей

Анализ бассейнов рек был дополнен картами: 1) площади бассейнов, 2) речной сети, где были выделены водотоки, собирающие воду с участков от 100 км² (в качестве иницирующего раstra выбрана общая водосборная площадь). Порядок водотоков определен по методу Штралера, 3) времени

концентрации потоков – время, которое необходимо потратить потоку на то, чтобы от самой удаленной точки бассейна достичь выхода бассейна, 4) средней длины водотоков. Кроме того, был рассчитан топографический индекс влажности, позволяющий определить предрасположенность конкретного участка территории к накоплению воды.

Было проведено сопоставление бассейнов этих рек (рис. 5.1) по следующим параметрам: площадь бассейна, общая длина водотоков, среднее значение индекса влажности, среднее значение индекса расчлененности рельефа, среднее значение LS фактора (табл. 5.1).

Таблица 5.1 Сравнение бассейнов крупных рек Архангельской области

Характеристики	Бассейн р. Онега	Бассейны рр. Сев. Двина и Вычегда	Бассейн р. Пинега	Бассейн р. Мезень
Площадь, кв. км	51 654	103964	47 247	33 030
Общая длина водотоков, км	227.43	422.71	180.45	127.04
Среднее значение индекса влажности	0.066	-0.082	-0.329	0.046
Среднее значение индекса расчлененности рельефа	4.50	4.93	6.00	4.62
Среднее значение LS фактора	0.0037	0.0042	0.0052	0.0039

Из таблицы видно, что, судя по средним значениям LS фактора, в бассейнах рек Пинеги и Северной Двины более развита плоскостная эрозия, чем в бассейнах рек Онеги и Мезени; по средним значениям индекса расчлененности рельефа следует, что наиболее разнороден рельеф в бассейне реки Пинеги; среднее значение индекса влажности позволяет судить о том, какие участки более склонны к накоплению воды, нежели к отторжению (транзиту) ее, таким образом, выходит, что в бассейнах рек Онеги и Мезени преобладают процессы накопления, а в бассейнах Северной Двины и Пинеги – процессы смыва и транзита и, как следствие, переноса загрязняющих веществ до геохимического барьера на уровне устья р. Сев. Двина – Двинской залив Белого моря (рис. 5.2).

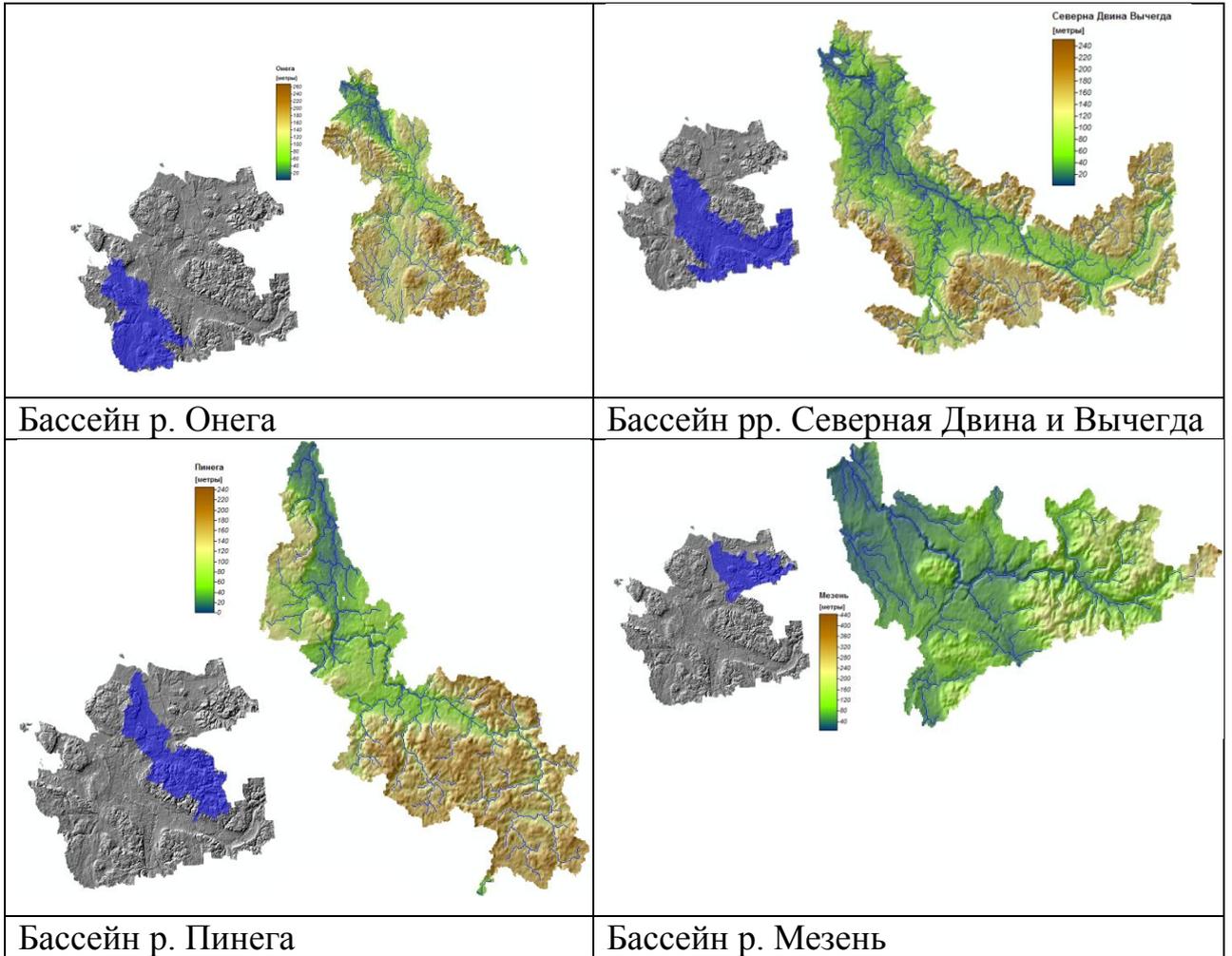


Рисунок 5.1. ЦМР бассейнов рек

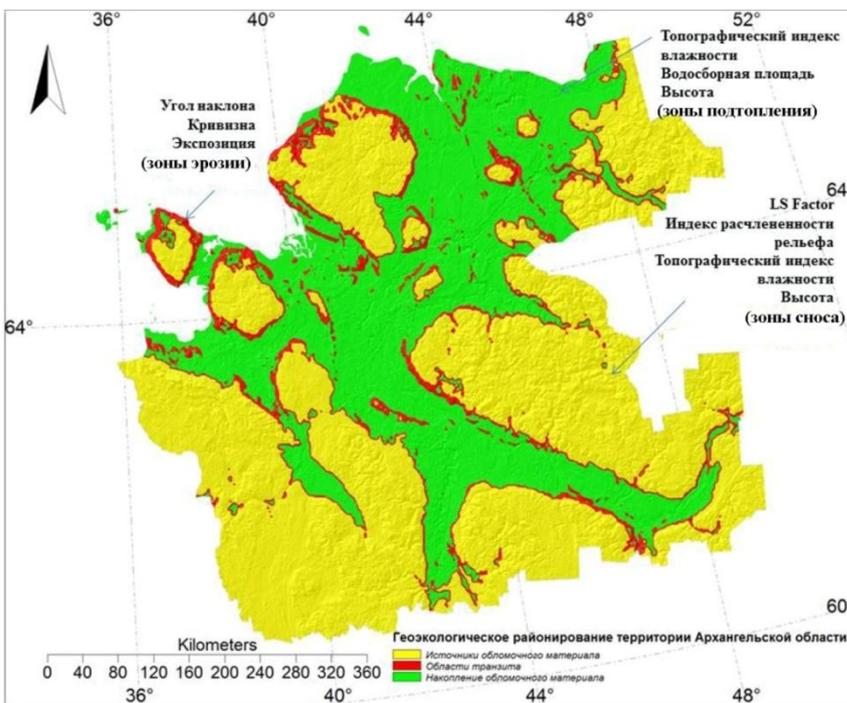


Рисунок 5.2. Бассейновое районирование для геоэкологической оценки водосборных площадей

5.2 Рельеф и эрозионные процессы на территории Архангельской области

Эрозионные процессы, протекающие на равнинных территориях, занятых лесными массивами, изучены достаточно слабо. Считается, что при сомкнутом растительном покрове смыв почв на склонах почти не происходит (Проблемы..., 1999). Однако вследствие антропогенного вмешательства сильно изменяется растительность и свойства грунтов, что обычно ведет к значительному увеличению темпов эрозии. Поэтому развитие эрозионных процессов, в первую очередь, хорошо изучено для территорий с большой площадью сельскохозяйственных угодий (Танасиенко и др., 1999), а также для горнодобывающих районов. Для сельскохозяйственных угодий проблема эрозии актуальна в связи с резким возрастанием скорости и интенсивности этих процессов на площадях с нарушенным почвенным и растительным покровом или испытывающим другие формы антропогенной нагрузки, а также высокой экономической значимостью таких земель. Для горнодобывающих районов – с проблемами просадки территорий в процессе добычи.

Земельные ресурсы Архангельской области (без НАО) составляют 41310.3 тыс. га. Большую часть из них (55.7%) занимают леса и кустарники, на долю болот, водных объектов и прочих земель приходится 41.9%. Сельскохозяйственные угодья и пашни составляют только 2.5% (734.1 тыс. га и 304.9 тыс. га соответственно), причем из них 5.4 тыс. га (0.5%) подвержено эрозионным процессам, 163.4 тыс. га (16%) – переувлажнению, 79.0 тыс. га (8%) – заболочены, 2.7 тыс. га (0.3%) – засолены, 85.0 тыс. га (8%) – засорены камнем (Состояние и охрана..., 2001, Козлов, 2002). Особенности сельхозугодий Архангельской области являются (Кутинов и др., 2012):

- небольшие размеры (2-3 га), где ошибка в определении границ в 20-30 метров весьма значима;
- нечетко выраженные контуры объектов (далеко не всегда прямолинейная форма);

- плавные (постепенные) переходы от лесного покрова и сельхозугодьям и т.п.

Учитывая малые размеры сельхозугодий и плавные переходы от лесного покрова, маловероятно отражение эрозии почв в принятой в нашем исследовании ЦМР (размер ячейки 30x30 м ~1”x1”);).

В естественных таежных ландшафтах с низкой антропогенной нагрузкой эрозионные процессы протекают значительно медленнее и находят более слабое отражение в формах рельефа. В последнее время в связи с глобальными изменениями климата, приводящими к активизации экзогенных процессов (Шаврина, 2002; Игловский, 2004), а также увеличением масштабов хозяйственной деятельности человека, стал актуальным вопрос изучения эрозионной устойчивости равнинных лесопокрываемых территорий Северной Европы.

При анализе реального состояния окружающей среды обращает на себя внимание повышенная освоенность материковой части Архангельской области. Значительный уровень трансформации был достигнут вследствие развития лесозаготовок, транспортировки и переработки древесины (в таежной зоне) (Кутинов и др., 2012). Одной из основных проблем на территории Архангельской области можно считать проблему последствий сплошных концентрированных рубок. В процессе таких рубок лесные экосистемы коренным образом трансформируются, поскольку используемые лесозаготовительные машины уничтожают деревья не только всех ярусов, но и подрост, напочвенный покров, повреждают почвы (Беляев, 1999). Сплошные рубки хвойных лесов на значительных территориях вызвали нежелательные последствия: таяние снежного покрова на вырубках и под пологом молодых лиственных лесов становится более интенсивным, чем под пологом хвойных лесов; развиваются процессы эрозии почв и вынос продуктов эрозии в ручьи и реки, что ведет к деформации донной части последних. Песчаные и глинистые наносы заполняют пониженные участки дна водотоков, уничтожают нерестилища ценных видов рыб, ухудшается их

кормовая база, происходит разрегулирование естественного стока воды по сезонам, уровень воды в межень снижается (Третьяков, Белогубова, 1991). Т.е. можно говорить о трансформации естественных ландшафтов.

Природной тенденцией изменения условий функционирования геологической среды (ГС) северных регионов является процесс глобального потепления. Последствия влияния этого процесса на ГС следующие: увеличение скорости денудационных процессов (заболачивание, термокарст, абразия берегов, плоскостной смыв и т.п.); изменение русел рек, аккумуляция донных отложений и дельтовых комплексов; изменение конфигурации и характера береговой линии («демпфера отрицательных воздействий»); изменение гидрологического режима подземных вод и зон аэрации пресных и минерализованных вод; увеличение выноса твердых взвешенных частиц (твердый сток). Наложение этих двух процессов – антропогенного и природного требует тщательного изучения учета их последствий, особенно синэнергетических эффектов.

Поэтому для оценки вышеперечисленных факторов необходимы количественные оценки параметров рельефа, которые будут служить основой для оценки динамики эрозионных процессов и трансформации ландшафтов.

Проведенный анализ был основан на детальной цифровой модели рельефа (разрешение 30×30 м $\sim 1'' \times 1''$;) и серии расчетных геоморфометрических параметров (глава 3). Однако в работе возможно привести лишь упрощенные изображения исходных моделей из-за очень сильного уменьшения. Тем не менее, главнейшие закономерности можно проследить и на этих схемах. Кроме оценки пространственного распределения проводилась и статистическая обработка для получения средних значений вышеприведённых параметров.

Как указывалось ранее (глава 4) степень эрозионной активности на территории Архангельской области может быть оценена на основе расчета и анализа геоморфометрических параметров рельефа. На основе созданной ЦМР были составлены (рассчитаны) карты: глубин заполнения впадин;

направления потоков; экспозиции склонов; уклона поверхности склонов; профильной и плановой кривизны; обобщенной профильной и плановой кривизн (классификация Трёха); индекса потенциала плоскостной эрозии (LS Factor); индекса расчлененности рельефа; индекса мощности эрозии; индекса баланса геомасс; общей и удельной водосборных площадей; топографического индекса влажности, потенциальной приходящей солнечной радиации (прямая, рассеянная, совокупная инсоляции) и фотосинтетически активной радиации (ФАР). В то же время, каждый из вышеперечисленных геоморфометрических параметров, отражает эрозионную активность в разной степени, подчеркивая ее отдельные черты.

5.3 Геоэкологическое районирование исследуемой территории по степени развития эрозионных и аккумулятивных процессов

Такие геоморфометрические параметры, как угол наклона, профильная кривизна и индекс расчлененности рельефа позволяют выделить зоны с максимальным развитием экзогенных процессов. Для этого были выделены три кластера для каждого из этих параметров (рис. 5.3). В кластер 3 попали наименьшие значения индекса, центр кластера – 0.33×10^{-4} , диапазон значений $[-2.71 \times 10^{-4}, -0.06 \times 10^{-4}]$. В кластер 2 (рис. 5.3А) попали наибольшие значения углов наклона, центр кластера 1.33° , диапазон значений $[0.98^\circ, 4.52^\circ]$. В кластер 2 (рис. 5.3Б) попали наибольшие значения индекса расчлененности рельефа, центр кластера 8.43, диапазон значений $[6.29, 27.73]$. Объединив три слоя, был получен слой с зонами максимального развития экзогенных процессов (рис. 5.3Г).

Зоны с протеканием экзогенных процессов были выделены с помощью кластерного анализа таких параметров, как угол наклона и индекс расчлененности (рис. 5.3А, В). В кластер 2 (рис. 5.3А) попали наибольшие значения углов, центр кластера 1.33° , диапазон значений $[0.98^\circ, 4.52^\circ]$. В кластер 3 попали наименьшие значения профильной кривизны, центр кластера -0.33×10^{-4} , диапазон значений $[-2.71 \times 10^{-4}, -0.06 \times 10^{-4}]$.

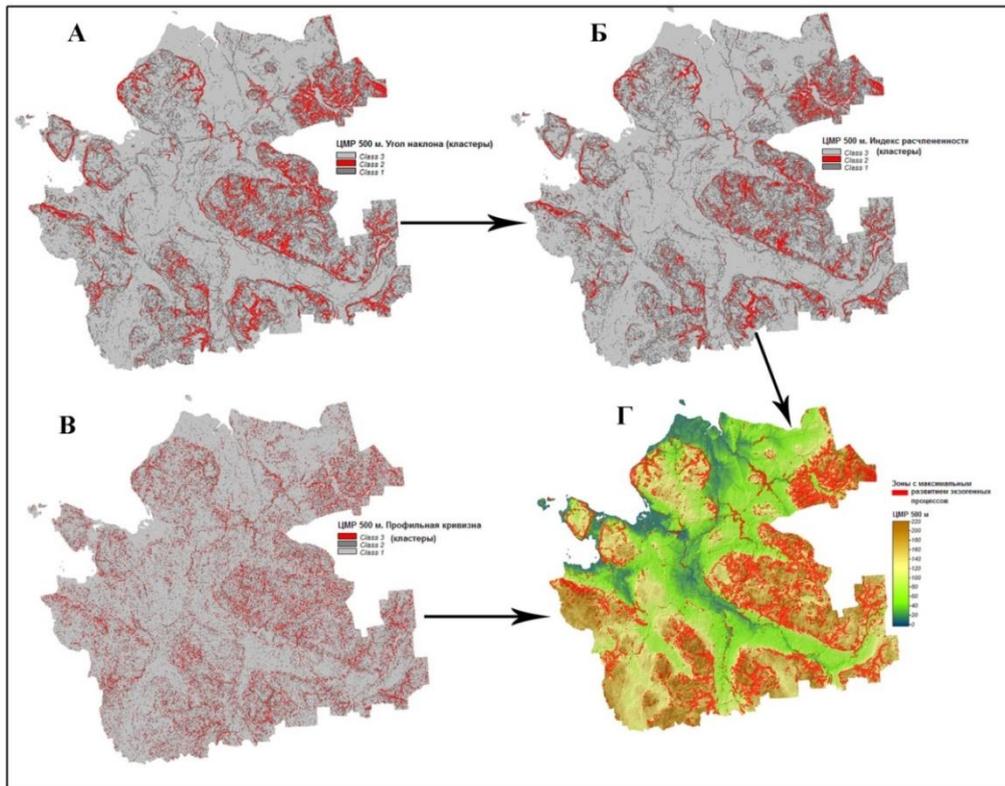


Рисунок 5.3. Выделение зон максимального развития экзогенных процессов

А – три кластера углов наклона на ЦМР с ячейкой 500 м; Б – три кластера индекса расчлененности на ЦМР с ячейкой 500 м; В – три кластера профильной кривизны на ЦМР с ячейкой 500 м; Г – зоны с максимальным развитием экзогенных процессов

Если зоны с максимальным развитием экзогенных процессов определили кластеры под номером 2 обоих параметров (кластеры с максимальными значениями параметров), то зоны, в которых наблюдаются экзогенные процессы, были выделены с помощью кластеров под номером 1 обоих параметров (кластеры со средними значениями параметров) (рис. 5.4).

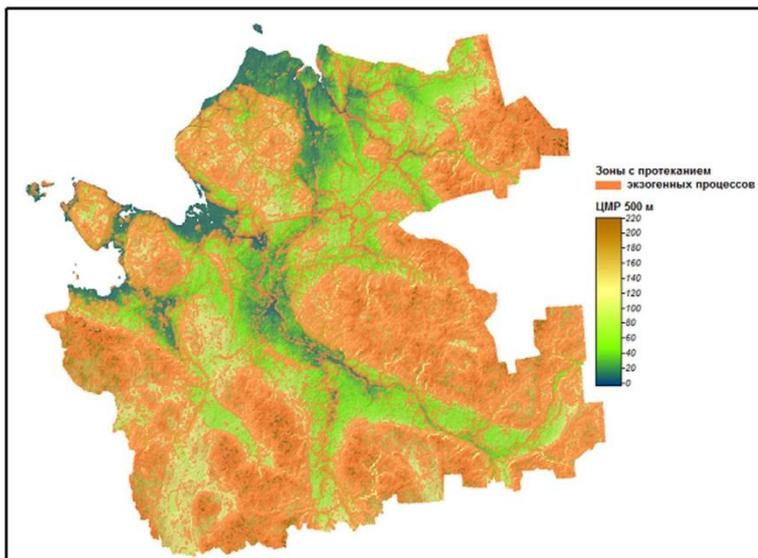


Рисунок 5.4. Зоны с протеканием экзогенных процессов

Диапазон значений угла наклона $[0.43^\circ, 0.98^\circ]$, центр кластера – 0.64° .
 Диапазон значений индекса расчлененности $[2.85, 6.29]$, центр кластера – 4.16.

Зоны аккумуляции и транзита выделялись с помощью значений профильной кривизны, плановой кривизны и классификации Трёха (рис. 5.5). Для этого были рассчитаны три кластера: плановой (горизонтальной) (рис. 5.5А) профильной (вертикальной) кривизны (рис. 5.5Б).

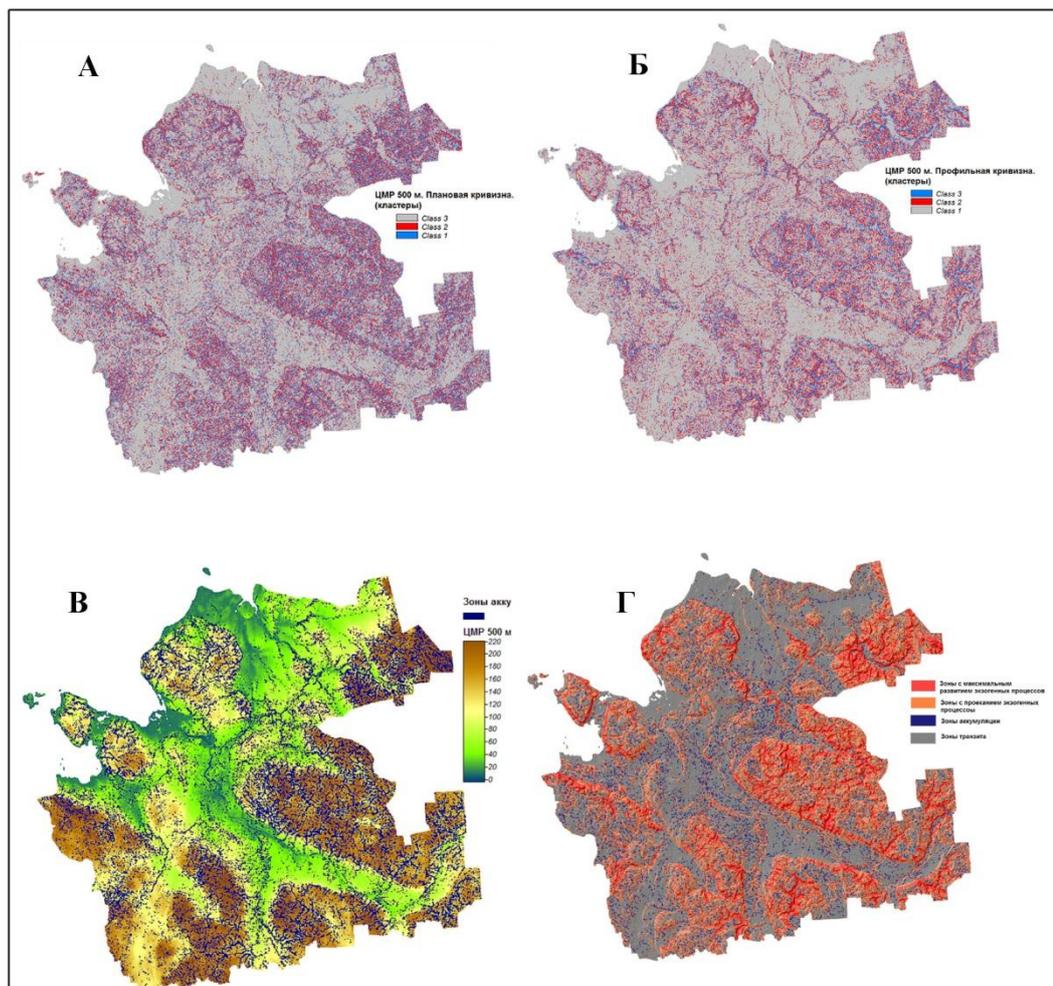


Рисунок 5.5. Выделение зон аккумуляции и транзита материала
 А – три кластера плановой кривизны на ЦМР с ячейкой 500 м.; Б – Три кластера профильной кривизны на ЦМР 500 м. Класс 3 определяет «вогнутые участки» – это минимальные значения кривизны; В – зоны аккумуляции; Г – Геоэкологическое районирование территории Архангельской области

В кластерах плановой кривизны класс 1 представляет «вогнутые участки» – это минимальные значения кривизны $[-2.78 \times 10^{-4}, -0.12 \times 10^{-4}]$; класс 2 определяет «выпуклые участки» – это максимальные значения

кривизны $[0.12 \times 10^{-4}, 2.15 \times 10^{-4}]$; класс 3 определяет «плоские участки» – это средние значения кривизны $[-0.27 \times 10^{-4}, 0.22 \times 10^{-4}]$.

В значениях профильной кривизны класс 3 определяет «вогнутые участки» – это минимальные значения кривизны $[-2.71 \times 10^{-4}, -0.06 \times 10^{-4}]$; класс 2 определяет «выпуклые участки» – это максимальные значения кривизны $[0.04 \times 10^{-4}, 2.10 \times 10^{-4}]$, класс 1 определяет «плоские участки» – это средние значения кривизны $[-0.17 \times 10^{-4}, 0.11 \times 10^{-4}]$.

В совокупности эти растровые слои определяют зоны аккумуляции (те области, где «вогнутые» участки пересекаются) (рис. 5.5В). Таким образом, выделив зоны с максимальным развитием экзогенных процессов, зоны с протеканием экзогенных процессов, зоны аккумуляции и транзита, была получена карта геоэкологического районирования территории Архангельской области по интенсивности протекания эрозионных и аккумулятивных процессов (рис. 5.5Г).

Ниже представлена таблица, описывающая зоны геоэкологического районирования Архангельской области. Все значения рассчитаны на ЦМР с размером ячейки 500 м (табл. 5.2).

Таблица 5.2 Статистические параметры зон развития эрозионных процессов

Зоны с максимальным развитием экзогенных процессов				
Параметр	Min	Max	Mean	StdDev
Плановая кривизна, 1/м	-0.287×10^{-3}	0.215×10^{-3}	0.005×10^{-3}	0.029×10^{-3}
Профильная кривизна, 1/м	-0.271×10^{-3}	0.210×10^{-3}	-0.001×10^{-3}	0.036×10^{-3}
Индекс расчлененности рельефа	6.280	27.734	8.426	2.139
Угол наклона, °	0.021	4.519	1.318	0.357
Зоны с протеканием экзогенных процессов				
Плановая кривизна, 1/м	-0.142×10^{-3}	0.121×10^{-3}	0.001×10^{-3}	0.021×10^{-3}
Профильная кривизна, 1/м	-0.143×10^{-3}	0.125×10^{-3}	-0.001×10^{-3}	0.023×10^{-3}
Индекс расчлененности рельефа	2.074	6.408	4.156	0.942
Угол наклона, °	0.006	1.220	0.626	0.167
Зоны аккумуляции				
Плановая кривизна, 1/м	-0.287×10^{-3}	-0.012×10^{-3}	-0.028×10^{-3}	0.016×10^{-3}
Профильная кривизна, 1/м	-0.271×10^{-3}	-0.017×10^{-3}	-0.036×10^{-3}	0.019×10^{-3}
Индекс расчлененности рельефа	0.987	23.728	4.502	2.444
Угол наклона, °	0.001	3.804	0.601	0.417

Было проведено сравнение полученных зон геоэкологического районирования с геоморфологической картой территории (рис. 5.6).

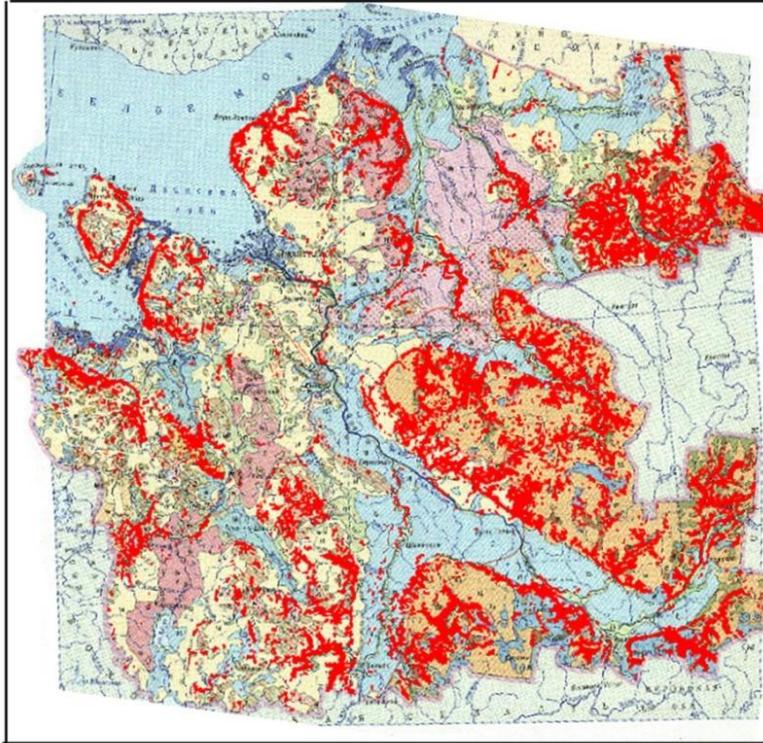


Рисунок 5.6. Зоны с максимальным развитием экзогенных процессов на геоморфологической карте Архангельской области

Сравнение показало, что зоны с максимальным развитием экзогенных процессов наблюдаются на границах абразионных склонов, где они расположены на плоских и волнистых моренных равнинах, местами абродированных ледниковыми и морскими волнами, вдоль речных долин с комплексом скульптурных и аккумулятивных террас. Им характерен так же холмистый и холмисто-грядовый моренный рельеф, холмистой-моренный и камовый рельеф, холмисто-котловинный камовый рельеф.

К характеристикам зон с протеканием экзогенных процессов наряду с характеристиками, описанными выше, следует отметить, что в отличие от предыдущих зон значительно большая их часть расположена на плоских и волнистых моренных равнинах, местами абродированных ледниковыми и морскими волнами, а также озерных и озерно-ледниковых равнинах.

Зоны транзита еще больше сконцентрированы на озерных и озерно-ледниковых равнинах.

Таким образом, зоны аккумуляции выделялись с помощью значений профильной и плановой кривизны и классификации Трёха (Troeh, 1964). В совокупности эти растровые слои определяют временные зоны аккумуляции (те области, где «вогнутые» участки пересекаются) и происходит накопление загрязняющих веществ (рис. 5.7).

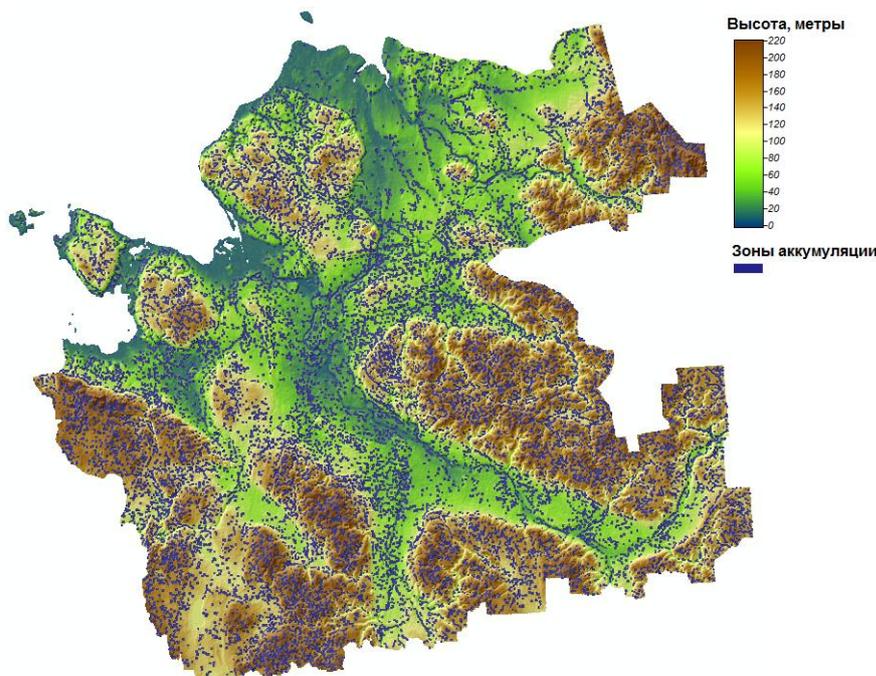


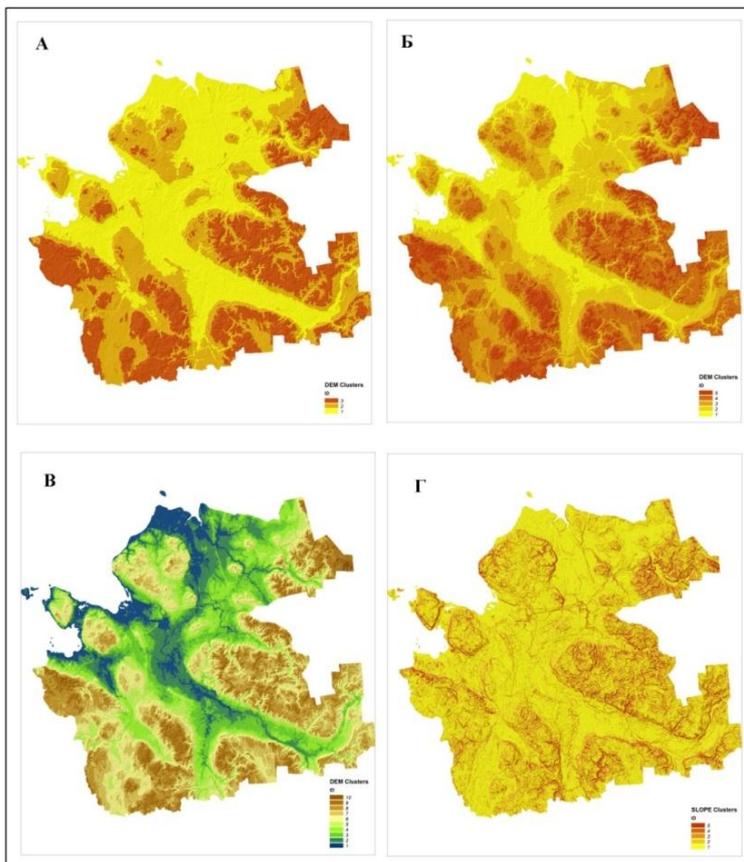
Рисунок 5.7. Зоны аккумуляции по результатам детального районирования

Зоны аккумуляции наблюдаются во всех описанных выше типах рельефа. Скорее всего, это обусловлено тем, что под зонами аккумуляции здесь понимаются бессточные понижения (впадины), этот слой состоит из разрозненных небольших участков, обусловленных перепадом высот на ЦМР.

В целом, процессы носят локальный характер, при этом емкость впадин невысока. Значения глубин впадин от 1 до 21 м, доминирующей является глубина 1 м (45 %), глубины 1-5 м занимают 81 % от всей выборки. Учитывая пространственное совпадение бессточных впадин с флексурными перегибами в осадочном чехле и областью развития карстующихся пород можно предположить, что здесь будет преобладать вертикальная миграция вещества. Подробные характеристики бессточных впадин приведены в разделе 3.2.

На более локальном уровне участками аккумуляции являются бессточные впадины. Этот подход, в отличие от применяемого Росгидрометом (по примерно равномерной сети) (Кутинов, 2005), позволяет оценить участки накопления загрязняющих веществ на разных уровнях детализации – от регионального до локального.

Особенностью данной работы является то, что появилась возможность «манипулируя» рассчитанными на основе подготовленной ЦМР геоморфометрическими параметрами, создавать комплект геоэкологических карт под конкретные задачи районирования территории, что достаточно хорошо видно на рис. 5.8. Так увеличивая количество классов кластеризации,



можно увеличивать детальность модели и расчетных геоморфометрических параметров не снижая разрешающую способность материалов.

Рисунок 5.8. ЦМР и геоморфометрические параметры с разным количеством кластеров А-В – ЦМР с разным количеством кластеров (3, 5, 10 классов соответственно); В – угол наклона поверхности (5 кластеров)

Таким образом, в выделенных геоэкологических районах о контурены зоны с разной степенью интенсивности процессов эрозии, транзита и накопления осадков и участки, предрасположенные к аккумуляции загрязняющих веществ для последующего проведения наземного мониторинга (четвертое защищаемое положение).

Заключение

В результате исследований были получены следующие выводы:

- выбор глобальной ЦМР для построения на ее основе производных продуктов основывается на целях и задачах, которые преследует этот продукт. Главным критерием необязательно должна быть детальность данных. Для некоторых областей задач вполне могут подойти и менее детальные цифровые модели, для других же, таких как, например, расчет параметров рельефа для инженерных изысканий, разрешение ЦМР является главным критерием, так как позволяет в более полной мере оценить эти параметры;

- анализ находящихся в свободном доступе ЦМР (GTOPO30, SRTM, SRTM Void Filled, GMTED2010, ACE2, ETOPO2 и ASTER GDEM v1, v2, v3, ArcticDem) показал, что наиболее подходящей из существующих для северных территорий РФ является модель ASTER GDEM v2;

- для создания корректной для геоэкологического районирования территории Архангельской области ЦМР на основе ASTER GDEM необходимо проведение следующих операций: 1) извлечение и объединение данных; 2) замена аномальных значений высотных отметок и «пустот» с использованием метода стат. анализа абсолютного медианного отклонения и данных GMTED2010 с искусственно уменьшенным размером ячейки; 3) устранение шероховатостей, шума и ошибок, возникающих при наложении снимков (модуль DTM Filter и модуль Simple Filter); 4) заполнение впадин (выбран метод L. Wang и H. Liu);

- сравнительный анализ наиболее распространенных ГИС программ (QGIS, GRASS, gvSIG, SAGA, MapInfo Professional, ArcGIS), их возможностей, методов обработки рельефа показал, что, учитывая задачи исследования, наиболее пригодной для геоморфометрического анализа рельефа является SAGA GIS;

- на основе созданной ЦМР и современных ГИС технологий рассчитаны геоморфометрические параметры рельефа, позволяющие на количественной основе проводить оценку современных эрозионных процессов и оценивать возможность накопления загрязняющих веществ;

- применение кластерного анализа для обработки ЦМР и геоморфометрических параметров позволяет получать статистические данные по классам, не теряя информации, как при использовании разноразмерных ячеек. Полученные таким образом границы проявления эрозионных процессов более наглядно и корректно;

- для оценки степени эрозионной активности наиболее оптимальными являются следующие геоморфометрические параметры: 1) для общего геоэкологического районирования: углы наклона, LS-фактор, индекс расчлененности рельефа и индекс влажности; 2) для оценки активности погребенного карста – плотность бессточных впадин; 3) такие геоморфометрические параметры, как угол наклона, профильная и плановая кривизна, индекс Треха и индекс расчлененности рельефа позволяют выделить зоны с максимальным развитием эрозионных процессов;

- на основе проведенного геоморфометрического анализа рельефа Архангельской области выделены геоэкологические районы, характеризующиеся различной потенциальной возможностью проявления эрозионных и аккумулятивных процессов;

- создана карта геоэкологического районирования территории Архангельской области на основе кластерного анализа значений углов наклона, потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор), индекса расчлененности рельефа и индекса влажности, позволяющая разделить всю исследуемую территорию на участки с различным типом происходящих процессов и выделить области предрасположенные: к подтоплению во время паводков, к заболачиванию, к процессам плоскостного смыва, к развитию карста и т.п.;

- данные полученные в результате геоморфометрического анализа позволяют дать характеристики региона с несколько иных позиций, чем при геоморфологическом районировании. Полученная карта геоэкологического районирования (на основе расчета геоморфометрических параметров рельефа) позволяет в отличие от геоморфологической карты дать характеристики не только рельефа, но и предрасположенности выделенных районов к развитию тех или иных эрозионных процессов;

- на основе кластерного анализа значений углов наклона, индекса расчлененности, профильной и плановой кривизн, индекс Треха и др., создана карта районирования по интенсивности протекания экзогенных процессов;

- значения горизонтальной (плановой) и вертикальной (профильной) кривизны склонов, показывают, что, хотя в общем случае на территории Архангельской области преобладают плоские поверхности, однако, по горизонтальной кривизне преобладают выпуклые склоны, по вертикальной – вогнутые;

- зоны с максимальным развитием экзогенных процессов наблюдаются на границах абразионных склонов, где они расположены на плоских и волнистых моренных равнинах, местами абродированных ледниковыми и морскими волнами, вдоль речных долин с комплексом скульптурных и аккумулятивных террас. Им характерен так же холмистый и холмисто-грядовый моренный рельеф, холмистой-моренный и камовый рельеф, холмисто-котловинный камовый рельеф;

- значительная часть зон с протеканием экзогенных процессов расположена на плоских и волнистых моренных равнинах, местами абродированных ледниковыми и морскими волнами, а также озерных и озерно-ледниковых равнинах. Зоны транзита еще больше сконцентрированы на озерных и озерно-ледниковых равнинах. Зоны аккумуляции наблюдаются во всех описанных выше типах рельефа;

- на региональном уровне основными зонами аккумуляции осадков, естественно, являются долины крупных рек Онеги, Северной Двины, Мезени, Пинеги, т.к. на них приходится на бассейны крупнейших рек региона;

- судя по средним значениям LS фактора, в бассейнах рек Пинеги и Северной Двины более развита плоскостная эрозия, чем в бассейнах рек Онеги и Мезени; по средним значениям индекса расчлененности рельефа следует, что наиболее разнороден рельеф в бассейне реки Пинеги; среднее значение индекса влажности позволяет судить о том, какие участки более склонны к накоплению воды, нежели к отторжению (транзиту) ее, таким образом, выходит, что в бассейнах рек Онеги и Мезени преобладают процессы накопления, а в бассейнах Северной Двины и Пинеги – процессы смыва и транзита. Таким образом, основным источником сносимого материала являются поднятия рельефа, а региональными основными зонами аккумуляции осадков, естественно, являются долины крупных рек Онеги, Северной Двины, Мезени, Пинеги, что вполне естественно, учитывая характер рельефа и интенсивность солнечной радиации, обуславливающей скорость таяния снежного покрова;

- в выделенных геоэкологических районах оконтурены зоны с разной степенью интенсивности процессов эрозии, транзита и накопления осадков и участки, предрасположенные к аккумуляции загрязняющих веществ для последующего проведения наземного мониторинга.

Особенностью данной работы является то, что появилась возможность, «манипулируя» рассчитанными на основе подготовленной ЦМР геоморфометрическими параметрами, создавать комплект геоэкологических карт под конкретные задачи районирования территории. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при прогнозировании опасных природных явлений, разработке мероприятий по их предотвращению и ликвидации их последствий, а также при народно-хозяйственном освоении приарктических регионов.

Список литературы

Арэ Ф.Э., Григорьев М.Н., Рахольд Ф., Хуббертен Х.В. Определение скорости отступления термоэрозионных берегов по размерам термотеррас // Криосфера Земли, 2004. – Т. VIII. – № 3. – С. 52-56

Атлас Архангельской области. – М.: ГУГК СССР, 1976. – 176 с.

Баранов Ю.Б. Геоинформационная технология обработки и комплексной геологической интерпретации материалов дистанционного зондирования (на примере сложнопо-строенных и труднодоступных территорий Алдано-Становой области) // Автореф. дисс...докт. геол.-мин. наук. – М.: МГГРУ, 2001. – 41 с.

Баранов Ю.Б., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В., Болсуновский М. А. Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR // Геоматика, 2008. – №1. – С. 37-45

Беляев В. В. Экологические условия антропогенных лесных экосистем //Геодинамика и геоэкология. Матер. междунар. конфер. Архангельск: изд-во ИЭПС УрО РАН, 1999. С. 33-34

Берлянд А.М. Образ пространства: карта и информация. – М.: Мысль, 1986. – 240 с.

Билибина Т.В. Блоковая тектоника и геодинамика земной коры северо-запада Русской платформы и принципы прогнозирования рудоносных структур // Блоковая тектоника и перспективы рудоносности Русской платформы. – Л.: ВСЕГЕИ, 1986. – С. 22-29

Волчанская И.К. Морфоструктурные закономерности размещения эндогенной минерализации. – М.: Наука, 1981. – 239 с.

Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. Автореф. дисс...докт. геогр. наук. – М., 1999. – 32 с.

Глотов А.А. Использование ЦМР для эффективного управления природопользованием // Геоинформатика, 2013. – № 4. – С.32-36.

Гофаров М.Ю., Болотов И.Н., Кутинов Ю.Г. Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: Тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров. – Екатеринбург, 2006. – 158 с.

Гриб В.П. Новые данные о геологии Архангельской области // Геология и полезные ископаемые Архангельской области. – М., 1986. – С. 5-20

Громцев А.Н. Основы ландшафтной экологии европейских таежных лесов России. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. – 238 с.

Губин В.Н., Коркин В.Д. Геоиндикационный подход к дешифрированию проявлений неотектонических движений // Разведка и охрана недр, 1986 – № 1. – С. 21-24

Дубинин М.Ю., Рыков Д.А. Открытые настольные ГИС: обзор текущей ситуации // Геопрофиль, 2010. – С. 34-44

Евсеева Н.С. Современные процессы рельефообразования юго-востока Западно-Сибирской равнины. Автореф. дисс....докт. геогр. наук. – Томск, 2006. – 43 с.

Жучкова В.К., Раковская Э.М. Методы комплексных физико-географических исследований: Учеб. пособие для студ. вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 368 с.

Игловский С.А. Особенности геоэкологического состояния криолитозоны Онего-Двинско-Мезенской равнины и полуострова Канин. Автореф. дисс.... канд. геогр. наук. – М., 2004. – 22 с.

Капустин И.Н., Кирюхин Л.Г. Геологические формации осадочного чехла Восточно-Европейской платформы и их нефтегазоносность // Изв. вузов. Геол. и разведка, 1987. – № 5. – С.16-24

Карта разломов СССР и сопредельных стран. Масштаб 1:2500000. Объяснительная записка. – Л., 1982. – 56 с.

Козлов В.Ф. Экология сельскохозяйственных земель Архангельской области // Проблемы экологии Архангельской области на рубеже веков: приоритеты, стратегии, направления. – Архангельск: Изд-во СГМУ, 2002. – С. 208-221

Коротков Ю.В. Поиск скрытых кимберлитовых тел с использованием импульсной индуктивной электроразведки в Архангельской Алмазоносной провинции. Дисс.... канд. геол.-минерал. наук. – М., РГГРУ, 2011. – 185 с.

Кочкуркин Н.В., Кутинов Ю.Г. О возможности применения аэрофотосъемки в экологических целях на территории Архангельской области. Факты и соображения // Север: экология. (Сб. научн. трудов). – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – С. 351-363

Кутинов Ю.Г. О структурно-тектоническом контроле эксплозивных тел Зимнего берега по данным аэроэлектроразведки // Изв. вузов. Геол. и разведка, 1991а. – № 6. – С. 118-121

Кутинов Ю.Г. Роль систем разломов в формировании тектонических структур Севера Русской плиты и размещении платформенного магматизма // Геология и полезные ископаемые Севера Европейской части СССР. – Архангельск, 1991б. – С. 23-33

Кутинов Ю.Г. Экогеодинамика Арктического сегмента земной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 388 с.

Кутинов Ю.Г., Боголицын К.Г., Чистова З.Б. Исследования северных территорий Земли из космоса: проблемы, свойства, состояние, возможности на примере МКС-Арктика. В 3-х томах. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. Т. 1 – 390 с. Т. 2. – 272 с. Т. 3 – 472 с.

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Комплексная модель процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах Севера Русской плиты // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время, 2012. – Т. 1. – Вып. 1

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. – Архангельск: ОАО «ИПП Правда Севера», 2004. – 285 с.

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Разломно-блоковая тектоника и ее роль в эволюции литосферы // Литосфера и гидросфера Европейского Севера

России. Геоэкологические проблемы. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – С. 68-112

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Иотов В.И., Юдахин Ф.Н. Отдельные аспекты геодинамики Фенно-Скандии // Геодинамика и геоэкология. Матер. Междунар. конфер. – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 1999. – С. 200-202

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Минеев А.Л. Современная тектоническая активность Кандалакшского грабена. Межгеосферное взаимодействие. Дегазация, ионизация и влияние на окружающую среду Hamburg: Lambert Academic Publishing, 2014. – 175 с.

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В., Минеев А.Л. Цифровое моделирование рельефа для прогноза площадей перспективных на нефть и алмазы // Актуальные проблемы нефти и газа, 2019. – Вып. 1(24). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art8>

Лосев К.С., Аничева М.Д., Чеснокова И.В. Ландшафтоведение и экология – соотношения и структурные единицы // Изв. секции Наук о Земле РАЕН, 2001. – № 6. – С. 67-70

Магматизм и металлогения рифтогенных систем восточной части Балтийского щита / А.Д. Щеглов, В.Н. Москалева, Б.А. Марковский и др. – СПб.: Недра, 1993. – 244 с.

Макаров В.И. Региональные особенности новейшей геодинамики платформенных территорий в связи с оценкой их тектонической активности // Недра Поволжья и Прикаспия, 1996. – Вып. 13. – С. 53-60

Малов А.И. Подземные воды Юго-Восточного Беломорья: формирование, роль в геологических процессах. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 234 с.

Методическое руководство по геоморфологическим исследованиям / Под ред. Г.С. Ганешина и др. – Л.: Недра, 1972. – 132 с.

Милашев В.А. Структуры кимберлитовых полей. Л.: Недра, 1979. – 183 с.

Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // *Пространство и Время*, 2015а. – № 3(21). – С. 278-291. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271provvr_st3-21.2015.83

Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V. 2 // *Современные проблемы науки и образования*, 2015б. – № 2; URL: www.science-education.ru/129-21949

Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2018. – Т. 15. – № 4. – С. 58-67. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>

Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Геоэкологическое районирование территории Архангельской области с использованием цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий // *Пространство и Время*, 2017. – № 2-3-4 (28-29-30). – С. 267- 288

Михайлов С.А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели. – Барнаул: «День», 2000. – 130 с.

Никольский Д.Б. Современные тенденции в радиолокационном дистанционном зондировании Земли // *Геоматика*, 2008. – № 1. – С. 7-10

Оньков И.В., Шиляева О.Ю., Онянова Т.А. Исследование точности радарных ЦМР, построенных по снимкам ALOS/PALSAR и модели SRTM, в зависимости от вида отражающей поверхности // *Геоматика*, 2012. – № 4. – С. 33-36

Познанин В.Л. Эрозионные процессы в криолитозоне // *Пространство и Время*, 2012. – № 1(7). – С. 127-132

Полякова Е.В. Геоморфометрический подход в геоэкологических исследованиях северных территорий страны // *Успехи современного*

естествознания. – 2018. – № 3; URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36712> (дата обращения: 13.04.2018).

Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Минеев А.Л. Опыт применения цифрового моделирования для выявления наследования структур фундамента в современном рельефе севера Русской плиты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 75-83. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-75-83

Проблемы теоретической геоморфологии. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 512 с.

Расширение возможностей национального картографирования на основе усовершенствованных серий Advanced Elevation компании DigitalGlobe // Геоматика, 2012. – № 4. – С. 37-39

Руководство по определению гидрографических характеристик картометрическим методом. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 96 с.

Савицкий А.В., Афанасьева Е.Н., Гукасян Г.О. Разрывные нарушения северо-запада Русской платформы и их металлогеническое значение // Блоковая тектоника и перспективы рудоносности северо-запада Русской платформы. – Л.: ВСЕГЕИ, 1986. – С. 39-52

Салоп Л.И. Геологическое строение Земли в докембрии. – Л.: Недра, 1982. – 343 с.

Сергеев И.С. Фрактальная структура земной поверхности и ее связь со строением земной коры (на примере северо-запада Архангельской области). Диссер...канд. геол.-минер. наук. – СПГУ. 2016. – 118 с.

Сергеев И.С., Егоров И.В. Структурная геоморфология Беломорского региона на основе фрактальной геометрии в среде ГИС // Известия Русского Географического Общества, 2015. – Т. 147. – Вып. 4. – С. 24-38

Сергиенко В.Г. Разнообразие и охрана природных территорий севера Восточной Европы. – СПб: ФБУ «СПбНИИЛХ», 2012. – 262 с.

Синицын А.В., Ермолаева Л.А., Станковский А.Ф. и др. О мезозойской тектонической и магматической активизации северной части Русской плиты // Докл. АН СССР, 1986. – Т. 287. – № 6. – С. 39-52

Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области в 2000 г. – Архангельск, 2001. – 195 с.

Станковский А.Ф., Веричев Е.М., Гриб В.П. и др. Новый тип магматизма в венде на севере Русской платформы // Докл. АН СССР, 1979. – Т. 247. – № 6. – С. 1456-1460

Станковский А.Ф., Якобсон К.Э. Структура фундамента и осадочного чехла Юго-Восточного Беломорья // Блоковая тектоника и перспективы рудоносности северо-запада Русской платформы. – Л.: ВСЕГЕИ, 1986. – 423 с.

Суходровский В.Л. Экзогенное рельефообразование в криолитозоне. – М.: Наука, 1979. – 280 с.

Танасиенко А.А., Путилин А.Ф., Артамонова В.С. Экологические аспекты эрозионных процессов. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 1999. – 89 с.

Третьяков В.М., Белогубова М.Н. Экологические проблемы Архангельской области и основные направления их решения // Социально-Экологические проблемы Европейского Севера. – Архангельск, 1991. – С. 3-17

Тяпкин К.Ф., Кивелюк Т.Т. Изучение разломных структур геолого-геофизическими методами. – М.: Недра, 1982. – 239с.

Флоринский И.В. Картографирование почвы на основе цифрового моделирования рельефа (по данным кинематических GPS-съемок и почвенных наземных съемок) // Исследования Земли из космоса, 2009. – № 6. – С. 56-65

Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: дисс... д-ра техн. наук. – Пущино, 2010. – 267 с.

Хромых В.В., Хромых О.В. Цифровые модели рельефа: Учебное пособие. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 178 с.

Шаврина Е.В. Карст юго-востока Беломорско-Кулойского плато, его охрана и рациональное природопользование. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. – Архангельск, 2002. – 22 с.

Шаврина Е.В, Малков В.Н, Гуркало Е.И. Особенности развития карста в Архангельской области // Северный Спелео Альманах, 2007. – № 7. URL: http://www.nordspeleo.ru/сса/сса_7/index.htm (дата обращения: 08.12.2014).

Шарый П.А. Геоморфометрический анализ пространственной изменчивости почв и экосистем: дисс... д-ра биол. наук. – Ростов-на-Дону, 2016. – 319 с.

Шарый П.А. Геоморфометрия в науках о Земле и экологии, обзор методов и приложений // Изв. Самарского научного центра РАН, 2006. – Т. 8. № 2. – С. 458-473

Экономика Архангельского Севера. Поморская энциклопедия. Том III. / Главный редактор О.М. Соколов. – Архангельск: АГТУ, 2006

ASTER Global DEM Validation. Summary Report / ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS, 2009. – 28 p. http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf

Buckley A. Understanding curvature rasters / ArcGIS Resources, 2010. <https://blogs.esri.com/esri/arcgis/2010/10/27/understanding-curvature-rasters/>

Currie D.J. Energy and large-scale patterns of animal- and plant-species richness // The American Naturalist, 1991. – V. 137(1). – P. 27-49

Davies R.G., Orme C.D.L., Storch D., Olson V.A., Thomas G.H., Ross S.G., Ding T.S., Rasmussen P.C., Bennett P.M., Owens I.P.F., Blackburn T.M., Gaston K.J. Topography, energy and the global distribution of bird species richness // Proceedings of the Royal Society, 2007. – Series B. – Vol. 274(1614). – P. 1189-1197. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.0061>

Dawod G., Al-Ghamdi K. Reliability of Recent Global Digital Elevation Models for Geomatics Applications in Egypt and Saudi Arabia // *Journal of Geographic Information System*, 2017. – Vol. 9. – P. 685-698. <https://doi.org/10.4236/jgis.2017.96043>

Demoulin A., Bovy B., Rixhon G. Cornet Y. An automated method to extract fluvial terraces from digital elevation models: The Vesdre valley, a case study in eastern Belgium // *Geomorphology*, 2007. – Vol. 91(1-2). – P. 51-64. <https://doi.10.1016/j.geomorph.2007.01.020>

Ehsani, Amir Houshang. Morphometric and Landscape Feature Analysis with Artificial Neural Networks and SRTM data: Applications in Humid and Arid Environments. Doctoral thesis, 2008. Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden.

Evans I.S. The effect of resolution on gradients calculated from an altitude matrix / Report 3 on Grant DA-ERO-591-73-G0040, 'Statistical characterization of altitude matrices by computer' (Appendix: Stationarity). – Durham, England: Department of Geography, University of Durham, 1975. – 24 p.

Faber V. Clustering and the continuous k-means algorithm // *Los Alamos Science*, 1994. – Vol. 22. – P. 138-144

Florinsky I.V. Computation of the Third-Order Partial Derivatives from a Digital Elevation Model // *International Journal of Geographical Information Science*, 2009. – Vol. 23(2). – P. 213-231

Florinsky I.V. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Amsterdam: Elsevier / Academic Press, 2012. – 379 p.

Garbrecht J., Martz L. W. Digital elevation model issues in water resources modeling // *Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems*. – 2000. – P. 1-28.

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications / Hengl T., Reuter H.I. (Eds.). Amsterdam: Elsevier, 2009. – 796 p.

Guisan A., Zimmermann N.E. Predictive habitat distribution models in ecology // *Ecological Modelling*, 2000. – Vol. 135(2-3). – P. 147-186

Hannah L., Lohse D., Hutchinson Ch., Carr J.L., Lankerani A. preliminary inventory of human disturbance of world ecosystem // *Ambio*, 1994. – № 4-5. – P. 246-250.

Jacobsen K., Passini R. Analysis of ASTER GDEM Elevation Models // *IntArchPhRS*. – Calgary, 2010. – Vol. XXXVIII. – part 1. – 6 p.

Jenson S. Domingue J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1988. – Vol. 54(11). – P. 1593-1600

Komarasamy G., Wahi A. A new algorithm for selection of better K value using modified hill climbing in IN K-means algorithm // *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 2013. – Vol. 55(3). – P. 307-314

Krcho J. Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory // *Acta Geogr. Univer. Comen. Geogr.-Phys.*, 1973. – Vol. 1. – P. 7-233

Li Z., Zhu Q., Gold C. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. – N.Y.: CRC Press, 2005. – 323 p.

Mark D.M., Smith B. A science of topography: From qualitative ontology to digital representations. In: Bishop M.P. and Shroder Jr. J.F. (eds.) *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*. – Berlin: Springer Verlag, 2004. – P. 75-100

Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS // *International Journal of GIS*, 1995. – Vol. 10. – P. 629-641

Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications // *Hydrol. Process.*, 1991. – Vol. 5(1). – P. 3-30

Morissette L., Chartier S. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica // *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 2013. – Vol. 9(1). – P. 15-24. doi:10.20982/tqmp.09.1.p015

Neteler M. SRTM and VMAP0 data in OGR and GRASS (2005) // GRASS Newsletter. – Vol. 3. – P. 2-6

Olewuezi N.P. Note on the comparison of some outlier labeling techniques // Journal of Mathematics and Statistics, 2011. – Vol. 7(4). – P. 353-355. <https://doi.10.3844/jmssp.2011.353.355>

Pelton J., Frazier E., Pickilingis E. Calculating slope length factor (LS) in the revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). GIS 4 Geomorphology, 2014. <http://gis4geomorphology.com/ls-factor-in-rusle/>

Pike R.J. Geomorphometry – Progress, Practice and Prospect. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband, 1995. – Vol. 101. – P. 221-238

Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // Catena, 2002. – Vol. 46(2). – P. 159-176

Richards J.A. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. – Berlin: Springer Verlag, 1993

Reily Shawn J., DeGloria Stephen D., Elliot Robert A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity. Intermountain Journal of Science, 1999. – Vol. 5(1-4). – P. 23-27

Siart C., Bubenzer O., Eitel B. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete // Geomorphology, 2009. – Vol. 112. – P. 106-121.

Seo S. A review and comparison of methods for detecting outliers in univariate data sets. Master's Thesis, University of Pittsburgh, 2006. – 53 p.

Shary P.A. Models of topography / Advances in Digital Terrain Analysis. / Q. Zhou, B. Lees, G. Tang (Eds.). Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, XIV. Berlin, etc.: Springer-Verlag., 2008. – P. 29-57. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77800-4_3

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental Quantitative Methods of Land Surface Analysis // Geoderma, 2002. – Vol. 107(1-2). – P. 1-32. [https://doi.10.1016/S0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.10.1016/S0016-7061(01)00136-7)

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. The problem of scale-specific and scale-free approaches in geomorphometry // *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 2005. – Vol. 28(1). – P. 81-101

Shawn J. Reily, Stephen D. DeGloria, Robert Elliot. A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity, 1999.

Skidmore A.K. Evolution of methods for estimating slope gradient and aspect from digital elevation models. In: Fisher P (ed.) *Classics from IJGIS: Twenty Years of the International Journal of Geographical Information Science and Systems*, CRC Press, Boca Raton, USA, 2007. – P. 111-117

Skidmore A.K. A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model // *International Journal of Geographical Information Science*, 1989. – Vol. 3(4). – P. 323-334

Straumann R.K. Extraction and characterisation of landforms from digital elevation models: Fiat parsing the elevation field. PhD thesis. Department of Geography. University of Zurich, Switzerland, 2010

Tachikawa T. et al. 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). – 2011.

Thompson J.A., Bell J.C. Butler C.A. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling // *Geoderma*, 2001. – Vol. 100(1-2). – P. 67-89. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00081-1)

Troeh F.R. Landform parameters correlated to soil drainage // *Soil Science Society of America Proceedings*, 1964. – Vol. 28(6)

Vatti Bala R. A generic solution to polygon clipping // *Communications of the ACM*, 1992. – Vol. 35(7). – P. 56-63. <https://doi.org/10.1145/129902.129906>

Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data // *IAPRS. Vol. XXXIII. Amsterdam*, 2000. – P. 935-942

Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // *International Journal of Geographical Information Science*, 2006. – Vol. 20(2). – P. 193-213. doi.org/10.1080/13658810500433453

Wilson J. P. Gallant J. C. Digital Terrain Analysis. In: Wilson J.P. and Gallant J.C. (eds.) *Terrain Analysis*. John Wiley & Sons, New York, USA, 2000. – P. 1-27

Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning: A Guide to Conservation Planning // *Agriculture Handbook*, 1978. – Vol. 237. – 65 p.

Wood J.D. The geomorphological characterisation of digital elevation models. Ph.D. Thesis. Leicester: Univ. Leicester, 1996. – 193 p.

Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography // *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987. – Vol. 12(1). – P. 47-56

Zhang W., Montgomery D.R. Digital elevation model grid size, landscape, representation, and hydrologic simulations // *Water Resources Research*, 1994. – Vol. 30(4). – P. 1019-1028

Zhu D., Ren Q., Xuan Y., Chen Y., Cluckie I.D. An effective depression filling algorithm for DEM-based 2-D surface flow modelling // *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013. – Vol. 17(2). – P. 495-505. <https://doi.org/10.5194/hess-17-495-2013>