

На правах рукописи

Минеев

МИНЕЕВ Александр Леонидович

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

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

**Автореферат на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Архангельск – 2020

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Российской академии наук (ФГБУН ФИЦКИА РАН)

Научный руководитель: **Кутинов Юрий Григорьевич**
доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы Института геодинамики и геологии ФИЦКИА РАН

Официальные
оппоненты: **Хуторской Михаил Давыдович**
доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией теплопереноса, главный научный сотрудник ФГБУН Геологический институт РАН (ГИН РАН), заслуженный деятель науки РФ

Максимович Николай Георгиевич
кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заместитель директора по научно-исследовательской работе Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета ПГНИУ, заслуженный эколог РФ

Ведущая организация: **Институт геологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИГ КарНЦ РАН)**

Защита состоится «26» марта 2020 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.121.04 при ФГБОУ ВО «РГГРУ имени Серго Орджоникидзе» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, зал диссертационных советов (каб.4-73).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, <http://mgri-rggru.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор геолого-минералогических наук



Ганова С. Д.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. 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.

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, преобладающего режима (аккумуляционного, эрозионного) и т.п.

На территорию Архангельской области до сих пор не было информации о рельефе, собранной из детальных данных ДЗЗ (обычно м-б 1:1000000), должным образом подготовленной и пригодной для геоэкологического районирования. 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.

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

В соответствии с целью работы были поставлены и решены следующие задачи:

- выделить основные черты геологического строения региона, определившие его геоморфологию;
- обосновать необходимость количественного (геоморфометрического) анализа рельефа 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 рельефа ASTER GDEM v2 с разрешением 1 угловая секунда (~30 метров), размер сцены 4100 на 4200 элементов, дополненная 1 сценой GMTED2010 (вся территория Архангельской области, 12734342 ячеек) с искусственно уменьшенным размером ячейки до 1 угловой секунды. Подготовлено 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. Создана карта геоэкологического районирования территории.

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» (Архангельск, САФУ, 2013 г.); 11-17 Всерос. открытых конфер. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли

из космоса», (Москва, ИКИ РАН, 2013-2019 гг.); Всерос. научн. конфер. с междунар. участием «Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI веке», (Архангельск, АНЦ УрО РАН, 2014 г.); III Международном GIS-форуме «Интеграция геопространства – будущее информационных технологий» (Москва, компания «Совзонд» 2015 г.); XLVIII Тектоническом совещании «Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ» (Москва, ОНЗ РАН, 2016 г.); II междунар. научн. конфер. «Природные ресурсы и комплексное освоение прибрежных районов Арктической зоны» (Архангельск, ФИЦКИА РАН, 2016 г.); XIX и XXI Науч. конфер. «Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых» (Москва, 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», (Москва, 2018, 2019 гг.); VI international scientific conference «Risks and Safety in Rapidly Changing World» (Prague, 2018 г.); X Междунар. научно-практич. конфер. «Геориск» (Москва, ИГЭ РАН, МЧС, 2018 г.); Всерос. конфер. с междунар. участием II Юдахинские чтения «Проблемы обеспечения экологической безопасности и устойчивое развитие арктических территорий» (Архангельск, ФИЦКИА РАН, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликована 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.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований.

Глава 1 Физико-географическая и геологическая характеристика района исследований

В главе приведены основные черты рельефа исследуемого региона, влияющие на выбор ЦМР, программного обеспечения (ПО) и применяемых методик обработки.

1) Большая площадь исследуемого региона (589913 км²) определяет использование цифровых моделей, как минимум, уровня DTED-1 или DTED-2.

2) Небольшие абсолютные значения высот и слабая расчленённость рельефа региона 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, что обуславливает требования к точности модели и ее «однородности».

3) Моноклиальное залегание пород осадочного чехла с малыми углами падения накладывает повышенные требования к точности и разрешению моделей.

4) Регион пережил несколько этапов тектоно-магматической активизации,

подчеркнутых составом и физико-механическими свойствами пород осадочного чехла и простираемостью тектонических нарушений, что сказывается на геоморфологии региона.

5) Несмотря на слабую расчлененность и «молодость» рельефа, обусловленных широким распространением отложений валдайского оледенения, большой мощностью перекрывающих четвертичных отложений (40-200 м), нивелирующих дочетвертичный рельеф, тектонические нарушения отражаются в современном рельефе территории.

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

7) Широкое распространение лесного покрова (295409 га, 65 % 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. К тому же средняя высота древостоя сопоставима с разрешением среднемасштабных ЦМР.

Разнообразие природных зон, большие лесные массивы, речные системы, арктическое побережье дают возможность для проведения широкомасштабных сопоставительных исследований, результаты которых могут быть с достаточной достоверностью распространены на территорию большей части России.

Глава 2 Создание цифровой модели рельефа Архангельской области, соответствующей геологическому строению и геоморфологии региона.

Для создания ЦМР, которая будет соответствовать геологическому строению и геоморфологии региона, и являться количественной основой для геоэкологического районирования, необходим выбор базовой модели и ее подготовка. Исходя из изложенных в Главе 1 особенностей региона, рациональным и достаточным является использование свободно распространяемых ЦМР уровня DTED-2. Сравнив актуальные на сегодняшний день глобальные ЦМР (распространяемые свободно – SRTM3; SRTM-30; ASTER GDEM v1, v2, v3; GTOPO30; ACE2; ETOPO2; GMTED2010 и ArcticDEM), можно сделать вывод о том, какие из них наиболее полно удовлетворяют задачам расчета параметров рельефа Архангельской области (рис. 1).

Наиболее точными по пространственному разрешению являются модели SRTM4, ASTER GDEM v2 и ArcticDEM. SRTM4 – наиболее качественная модель (минимальное количество артефактов), но она не покрывает исследуемую территорию. Такие модели как GTOPO30, GMTED2010, ACE2, ETOPO и др. имеют не только более грубое разрешение, но и весьма неоднородны по исходному материалу, что влечет за собой меняющуюся от региона к региону точность. К тому же, во всех этих ЦМР для коррекции использовались данные SRTM, которые не охватывают территорию исследования.



Рис. 1. Упрощенный алгоритм выбора цифровой модели рельефа

Наибольшей разрешающей способностью обладает 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 показало значительное количество артефактов последней, что вполне закономерно при использовании оптических снимков в районах с высоким процентом облачности.

Таким образом, наиболее оптимальной из оставшихся моделей является ASTER GDEM v2, поскольку имеет детальное пространственное разрешение в сочетании с точностью по высоте и однородностью исходного материала.

Диссертантом проведен сравнительный анализ модулей обработки рельефа распространенных ГИС программных продуктов: ArcGIS (модуль Spatial Analyst); MapInfo (модуль Vertical Mapper); SAGA (модуль Terrain Analysis); GRASS; QGIS (Quantum GIS); gvSIG (модуль SEXTANTE) и др. Для задач исследования была выбрана SAGA GIS, обладающая возможностью расчета наибольшего числа геоморфометрических параметров.

Подготовка ЦМР территории Архангельской области для геоэкологического районирования включала в себя следующие этапы (Минеев и др., 2015): 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 (гидрологическая коррекция). Все операции производились в свободном программном продукте SAGA GIS. Далее была проведена проверка корректности полученной модели (Минеев и др., 2018).

В результате объединения и извлечения данных были получены 2 слоя: растровый, содержащий объединенные сцены ASTER GDEM v2 с приведенными к

единому значению областями отсутствующих данных, и векторный, содержащий полигоны границ Архангельской области. Для заполнения недостающих данных в ЦМР ASTER GDEM v2 были использованы данные из ЦМР GMTED2010 с искусственно уменьшенным размером ячейки до 1".

Для обнаружения выбросов были проанализированы методы: среднеквадратического отклонения (3SD); Z-Score; модифицированный метод Z-Score (Modified Z-Score); абсолютного медианного отклонения (3MADe); правило медианы (Median Rule). Для определения аномальных значений в ЦМР диссертантом был написан сценарий на языке программирования Python, который позволяет рассчитывать вероятные диапазоны значений и отбрасывать выбросы.

Затем была проведена операция устранения шероховатостей, шума и ошибок наложения снимков с использованием модуля DTM Filter. Для сглаживания ЦМР был применен фильтр, основанный на среднеквадратическом отклонении, реализованный в модуле Simple Filter.

На последнем этапе подготовки была произведена гидрологическая коррекция модели. Наиболее эффективными способами устранения впадин являются методы авторов L. Wang и H. Liu (Wang, Liu, 2006) и O. Planchon и F. Darboux (Planchon, Darboux, 2002), реализованные в SAGA GIS. В данном исследовании был выбран метод (Wang, Liu, 2006). Подготовленная ЦМР приведена на рис. 2.

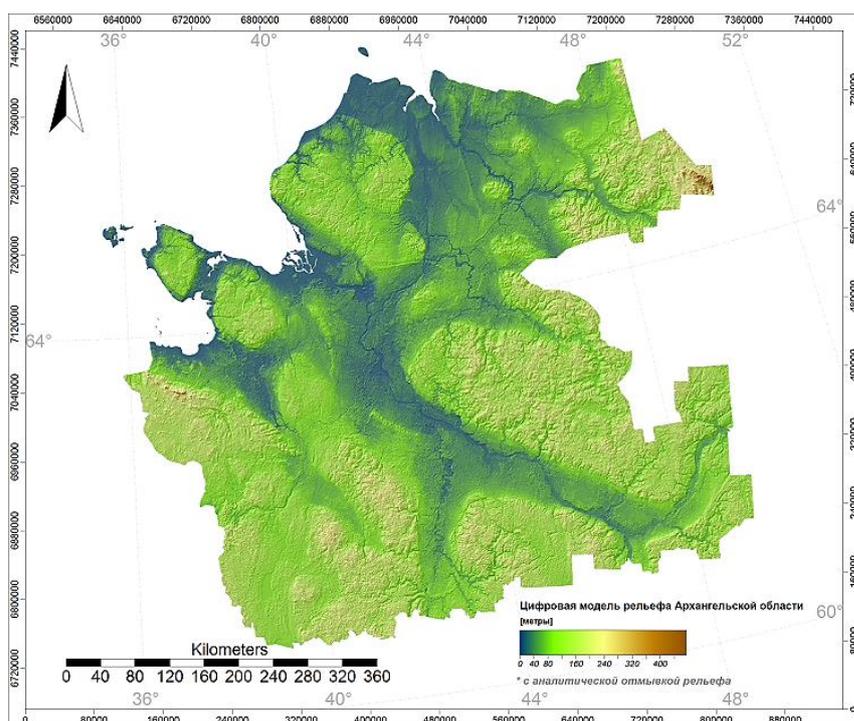


Рис. 2. ЦМР Архангельской области (размер ячейки 480×480 м; система координат: Пулково 1995, проекция: Гаусса-Крюгера, Зона 6)

Далее был проведен анализ пригодности построенной ЦМР для проведения на ее основе геоэкологических исследований. Точность (надежность) построенной ЦМР проверялась сопоставлением с точками плановой съемочной сети открытых векторных данных ГИС Панорама; ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200000 в ПО ГИС GRASS; проведенными полевыми замерами высот с помощью GPS-навигатора. Установлено, что лишь 2 % значений имеют расхождение свыше 20 м. Эти остаточные значения приходятся на территорию, где в исходном виде отсутствовали данные ASTER GDEM v2. Сравнение высот по GPS-навигатору также показало, что различия в значениях укладываются в диапазон от 0 до 20 м,

что соотносится с пространственным разрешением исходной модели (~30 м) и точностью по высоте (12-20 м). В целом, построенная ЦМР является точной (надежной) и пригодной для дальнейшего геоморфометрического анализа с целью получения геоэкологически значимой информации (Минеев и др., 2018).

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

Глава 3 Выбор геоморфометрических параметров рельефа и методик их расчета.

На основе подготовленной ЦМР производился выбор и расчет геоморфометрических параметров для геоэкологического районирования территории. Учитывая большое количество и разнообразие таковых, одной из задач исследования являлось формирование оптимального набора параметров, а также последовательности и методики их расчета. Поэтому был проведен теоретический анализ геоморфометрических параметров, который 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).

Карты параметров, формулы их расчета и анализ приведены в тексте диссертации.

Учитывая особенности строения территории, ряд параметров, например, таких, как баланс геомасс характеризуют локальные процессы, слабо проявленные на исследуемой территории. 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 вначале был проведен анализ исследуемой территории на основе упрощенной теоретической ЦМР с использованием функции $Z = \frac{\sin(x) \cdot \cos(y)}{5}$ и тестовых участков (Онежский полуостров, Беломорско-Кулойское плато) с проверкой для всей территории области.

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.

Учитывая большое количество видов используемых в геоморфометрии кривизн, диссертантом было проведено их изучение и выбраны для расчетов профильная (вертикальная) и плановая (горизонтальная) кривизны, отражающие процессы эрозии, аккумуляции и транзита осадков. Также было осуществлено выделение форм рельефа по классификации Трёха (Troeh, 1964).

В результате расчета геоморфометрических параметров рельефа был создан комплект монофакторных геоэкологических карт (рис. 3), позволяющих выделить зоны сноса, транзита и накопления осадочного материала, оценить их пространственное положение, дать количественные характеристики процессам эрозии и аккумуляции, а также оценить потенциальную устойчивость и/или склонность к эрозии различных участков исследуемой территории.

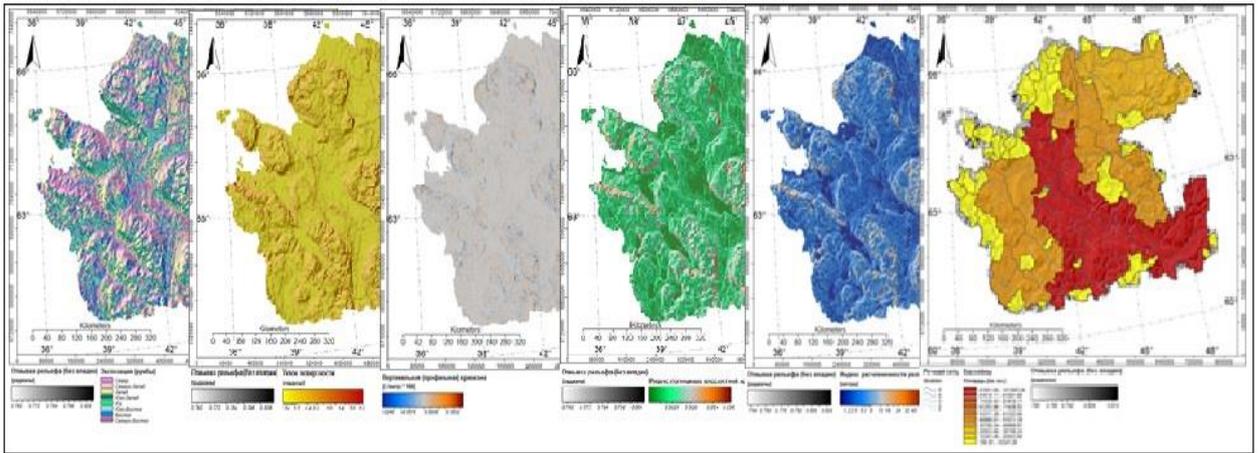


Рис. 3. Пример монофакторных карт геоморфометрических параметров рельефа, рассчитанных в программном продукте SAGA GIS

Остальные геоморфометрические параметры при оценке эрозионной активности имеют либо вспомогательное значение, либо локальный характер применения.

Для определения применимости полученных результатов и выделения региональных и локальных закономерностей построены карты высот и геоморфометрических параметров (размер ячейки 30×30 м, $\sim 1''$). Для более четкого выделения разноранговых структур и неоднородностей рельефа площади исследований подвергались дальнейшей обработке, заключающейся в выделении их региональной и локальной составляющих различными окнами фильтрации – 480×480 м ($\sim 15 \times 15''$), 960×960 м ($\sim 30 \times 30''$) и 1920×1920 м ($\sim 60 \times 60''$). Также применялся кластерный анализ с разным количеством классов. Кроме пространственного распределения параметров, была проведена статистическая обработка материала для оценки их доли в общей площади исследований.

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 (исходное разрешение ASTER GDEM) – $[0; 474]$. Преобладающее большинство значений расположено в диапазоне $[0; 272]$ метров. Анализ частот распределения высотных отметок рельефа говорит о бимодальном распределении, которое отражает два класса поверхностей рельефа – возвышенности, и низменности (бассейны рек и приморские равнины). Эта закономерность отчетливо проявляется (в первой итерации) практически во всех

геоморфометрических параметрах, так же как и снижение значений параметров при увеличении размера окна сглаживания. Таким образом, применение окон осреднения, хотя и не искажает общую картину распределения высотных значений, но уменьшает их значения. Учитывая небольшие абсолютные значения высот и слабую расчленённость рельефа, применение метода осреднения переводит ряд процессов в более низкий ранг их опасности. Поэтому был применен кластерный анализ методом k-средних автора Forgy, использующий формулу (Morissette, Chartier, 2013), который не искажает значения исходных данных:

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

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 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 пренебречь, оставляя в рассмотрении только основные, характерные всему региону особенности. Сама процедура генерализации состояла из нескольких шагов: 1) выбор окна осреднения: размер этого окна зависит от площади исследуемой территории, чем больше площадь, тем большее окно можно выбрать. Для ЦМР Архангельской области было выбрано окно 10 км; 2) сглаживание осредненных данных к исходному размеру ячейки билинейным сплайном. После такой процедуры, выделяемые с помощью кластерного анализа зоны, имеют гладкие, визуально определяемые границы.

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).**

Глава 4 Геоэкологическое районирование исследуемой территории.

Геоэкологическое районирование территории на основе кластерного анализа выбранных геоморфометрических параметров (угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности), проводилось 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). В результате получены контуры, разделяющие область исследования на три части: максимальные, средние и минимальные значения каждого из параметров.

Второй этап заключался в нахождении общих границ контуров, соответствующих максимальным, средним и минимальным кластерам значений параметров. В данной работе средствами ГИС это выполнялось векторизацией

растровых областей в полигоны и вычислением пересечения полигонов.

На третьем этапе зона объединенных контуров минимальных значений параметров делилась на две части по степени увлажнения. Для этого 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 территории.

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

На пятом этапе по каждой из полученных зон районирования (рис. 4, А) были посчитаны средние значения различных геоморфометрических параметров для того, чтобы можно было дать характеристику протекающих в каждой из зон процессов.

На шестом этапе полученная карта районирования сопоставлялась с геоморфологической картой Архангельской области (рис. 4, Б, табл. 1).

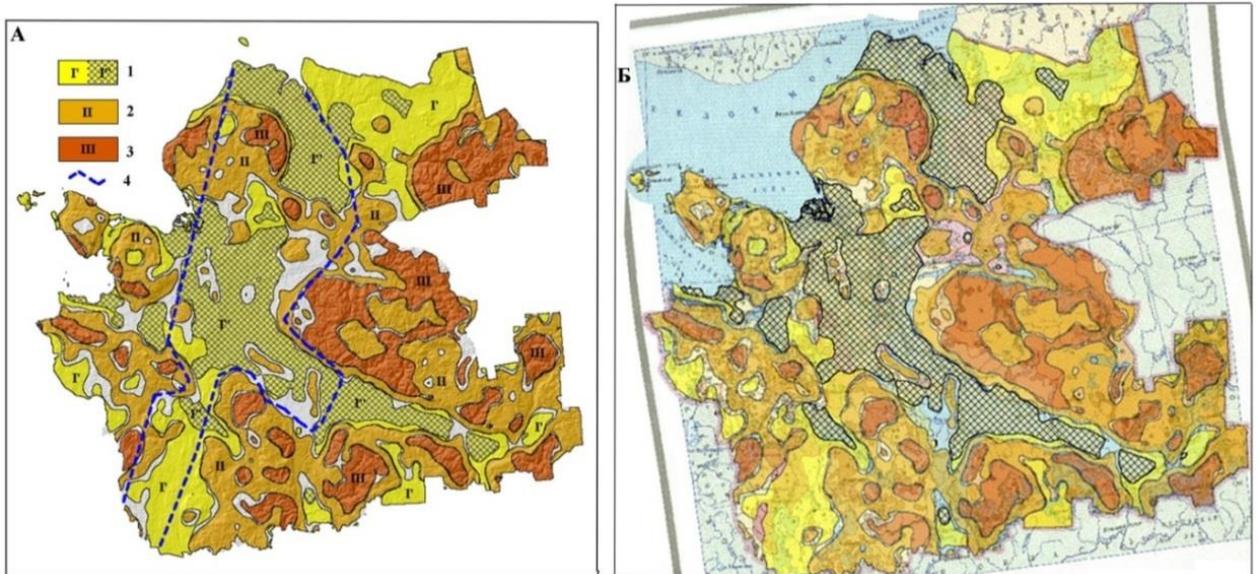


Рис. 4. Сопоставление материалов

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 I' – склонные к заболачиванию; I'' – 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).

Следует отметить, что данные, полученные в результате геоморфометрического

анализа, позволяют дать характеристики региона с несколько иных позиций, чем при геоморфологическом районировании (табл. 1). 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 1. Геоморфологическая и геоморфометрическая характеристики выделенных зон

Зона	Геоморфология	Геоморфометрия
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, 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 абрадированные ледниковыми и морскими водами.</p> <p>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 абрадированная ледниковыми и морскими водами, а также холмистый и холмисто-грядовый моренный рельеф.</p> <p>На северо-востоке области характерен структурно-денудационный (пластовый рельеф) – это крупноволнистые равнины на горизонтально лежащих палеозойских осадочных породах с маломощным покровом (водно-ледниковых).</p> <p>На северо-западе и юго-западе области характерен ледниковый аккумулятивный тип рельефа – это плоская и волнистая моренная равнина, местами абрадированная 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>

Ш	<p>На юго-востоке, юге и юго-западе области этой зоне характерен ледниковый аккумулятивный тип рельефа – это плоская и волнистая моренная равнина, местами абрадированная 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.</p> <p>На северо-западе области в этой зоне наблюдается холмисто-котловинный камовый рельеф (форма рельефа – карст).</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>
---	--	--

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. 2). Пример сопоставления показан на рис. 5.

Таблица 2. Сопоставление материалов с выделенными зонами

	Зона I' (заболочивание)	Зона II'' (подтопление 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 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 абрадирующая ледниковыми и морскими водами, холмистый и холмисто-грядовый моренный рельеф	Плоская и волнистая моренная равнина, местами абрадирующая 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
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

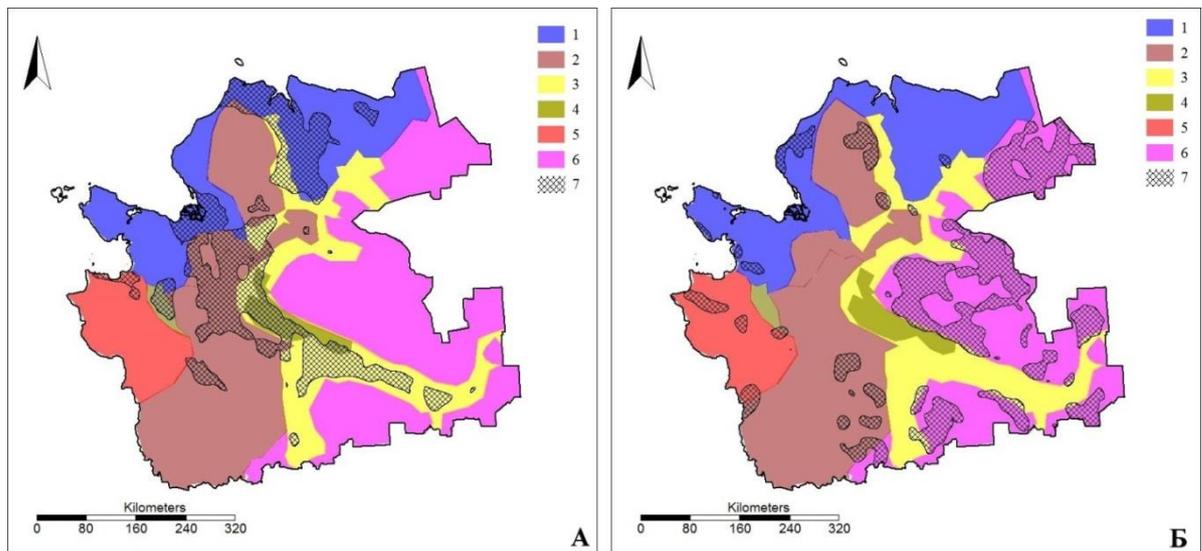


Рис. 5. Сопоставление схемы ландшафтов с зонами геоэкологического районирования:

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, болота таежные верховые; 5 – низменные на валдайской суглинистой морене, местами всхолмленные; 6 – возвышенные на московской, преимущественно бескарбонатной суглинистой морене.

Зоны районирования: 7 на рис. 5А – Зона I^р (подтопления во время паводков); 7 на рис. 5Б – Зона III (территории, сильно предрасположенные к развитию эрозионных процессов).

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

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.

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. На региональном уровне: 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 аккумуляции осадков. Поэтому было необходимо провести бассейновое районирование территории для геоэкологической оценки водосборных площадей.

Анализ бассейнов рек состоял из расчетов:

- площади бассейнов;
 - 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;
- времени концентрации потоков – время, которое необходимо потратить потоку на то, чтобы от самой удаленной точки бассейна достичь выхода бассейна;
 - средней длины водотоков;
 - топографического индекса влажности, позволяющего определить предрасположенность конкретного участка территории к накоплению воды;
 - LS фактора (развитие процессов плоскостного смыва;
 - индекса расчлененности рельефа.

Анализ водосборных бассейнов наиболее крупных рек территории показал, что они не настолько однородны, как считалось ранее, и процессы аккумуляции в них протекают неодинаково (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение бассейнов крупных рек Архангельской области

Характеристики	Бассейны рек			
	Онега	Сев.Двина и Вычегда	Пинега	Мезень
Площадь, км ²	51654	103964	47247	33030
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

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 (аккумуляции), нежели отторжению (транзиту). Таким образом, 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. 6).

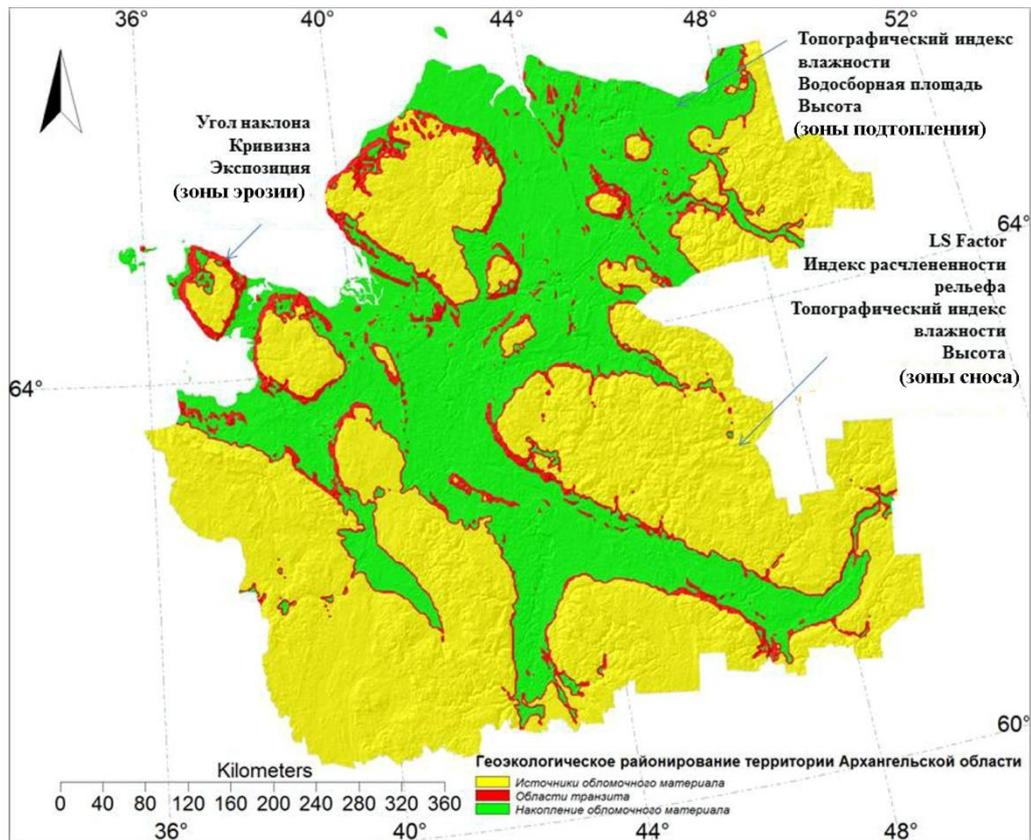


Рис. 6. Пример геоэкологической оценки водосборных площадей

Для оценки влияния рельефа на пространственное размещение зон временной аккумуляции (на более детальном уровне) по результатам кластерного анализа и расчетов геоморфометрических параметров рельефа были выделены следующие классы:

- 1) зоны с максимальным развитием экзогенных процессов;
- 2) зоны с протеканием экзогенных процессов;
- 3) зоны транзита;
- 4) зоны аккумуляции осадков, в т.ч. и загрязняющих веществ.

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: угла наклона; индекса расчлененности; профильной кривизны. Объединив три слоя, был получен слой с зонами максимального развития экзогенных процессов.

Зоны с протеканием экзогенных процессов были выделены с помощью кластерного анализа таких параметров, как угол наклона и индекс расчлененности. Если зоны с максимальным развитием экзогенных процессов определили кластеры с максимальными значениями параметров, то зоны, в которых наблюдаются экзогенные процессы, были выделены с помощью кластеров со средними значениями параметров. Зоны аккумуляции и транзита выделялись с помощью значений профильной кривизны, плановой кривизны и классификации Треха. Для

этого были рассчитаны три кластера: плановой (горизонтальной) профильной (вертикальной) кривизны.

В совокупности эти растровые слои определяют зоны аккумуляции (те области, где «вогнутые» участки пересекаются). 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 процессов. В табл. 4 представлены статистические характеристики зон развития эрозионных процессов.

Таблица 4. 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

При сопоставлении полученных зон геоэкологического районирования с геоморфологической картой территории выявлено, что зона с максимальным развитием экзогенных процессов соответствует границам абразионных склонов. Эти участки расположены на плоских и волнистых моренных равнинах, местами абродированных ледниковыми и морскими волнами, вдоль речных долин с комплексом скульптурных и аккумулятивных террас. Им характерны следующие типы рельефа: холмистый и холмисто-грядовый моренный, холмистой-моренный и камовый, холмисто-котловинный камовый.

Для зон с протеканием экзогенных процессов, наряду с характеристиками, описанными выше, следует отметить, что в отличие от предыдущей зоны, 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.

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.

Таким образом, зоны аккумуляции выделялись с помощью значений профильной и плановой кривизны и классификации Трѣха. В совокупности эти растровые слои определяют временные зоны аккумуляции (те области, где «вогнутые» участки пересекаются) и происходит накопление загрязняющих веществ (рис. 7).

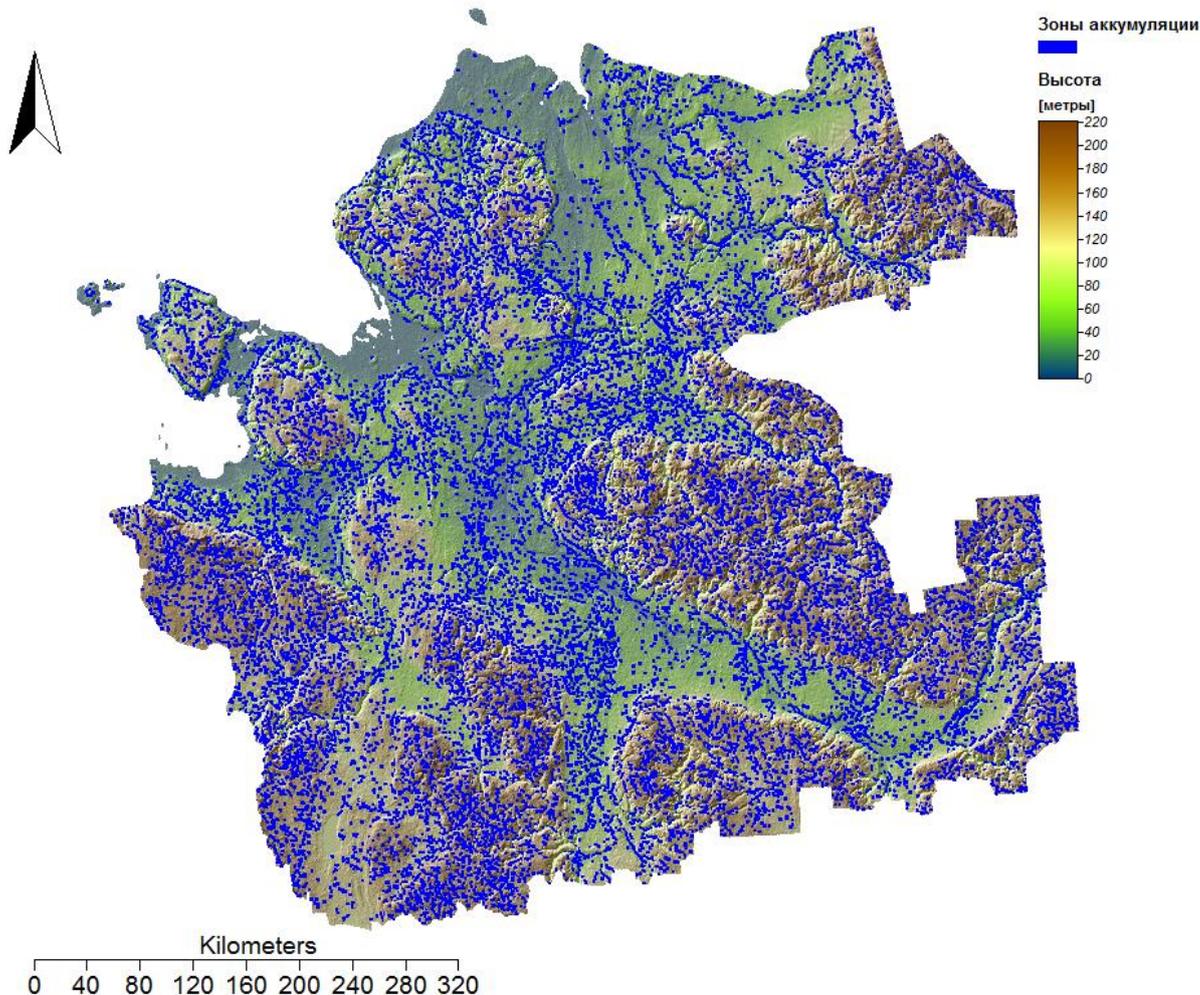


Рис. 7. Зоны аккумуляции по результатам детального районирования

На более локальном уровне участками аккумуляции являются бессточные впадины. Этот подход, в отличие от применяемого Росгидрометом (по примерно равномерной сети), позволяет оценить участки накопления загрязняющих веществ на разных уровнях детализации – от регионального до локального. Именно в этих районах необходимо проведение регулярного наземного мониторинга, а не размещение точек наблюдений равномерно по всей площади.

Таким образом, **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 (четвертое защищаемое положение).**

Выводы:

В результате проведенных исследований были получены следующие выводы:

- Анализ существующих и находящихся в свободном доступе ЦМР (GTOPO30, SRTM, SRTM Void Filled, GMTED2010, ACE2, ETOPO2 и ASTER GDEM v1, v2, v3, ArcticDem) показал, что наиболее подходящей для геоэкологического районирования территории Архангельской области является ASTER GDEM v2.

- Подготовку исходной ЦМР для дальнейшего геоэкологического районирования необходимо осуществлять в следующей очередности: 1) извлечение и объединение данных; 2) замена аномальных значений высотных отметок и «пустот» с использованием метода абсолютного медианного отклонения статистического анализа 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 (метод L. Wang и H. Liu).

- На основе созданной детальной корректной цифровой модели рельефа и современных ГИС технологий рассчитаны геоморфометрические параметры рельефа, позволяющие на количественной основе проводить оценку современных эрозионных процессов и оценивать возможность накопления загрязняющих веществ.

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

- 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 геоэкологические районы, характеризующиеся однотипными эрозионно-аккумулятивными процессами, отражающие геолого-геоморфологическое строение и геодинамический режим региона.

- 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, индекса Треха и др., создана карта районирования по интенсивности протекания экзогенных процессов.

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

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Монографии

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

2. Кутинов Ю.Г., **Минеев А.Л.**, Чистова З.Б., Полякова Е.В. Выбор цифровой модели рельефа северных арктических территорий РФ для геоэкологического районирования // Коллективная монография «География арктических регионов 2017». – СПб.: Типография ООО «Старый город», 2017. – 236 с.

Статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК

3. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Гофаров М.Ю., **Минеев А.Л.** Современная тектоническая активность Кандалакшского грабена по комплексу данных // Вестник Северного Арктического федерального университета. Серия Естественные науки, 2013. – № 4. – С. 21-29

4. **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, 2015. – № 2. URL: www.science-education.ru/129-21949

5. Polyakova E., Gofarov M., Kutinov Y., Beljaev V., Chistova Z., Neverov N., Staritsyn V., **Mineev A.**, Durynin S. Erosion processes in karst landscape of the Russian plain northern taiga, based on digital elevation modelling // Journal of Mountain Science, 2016. – 13(4). – P. 569-580. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3642-3> (WoS)

6. Neverov N.A., Belyaev V.V., Chistova Z.B., Kutinov Y.G., Staritsyn V.V., Polyakova E.V., **Mineev A.L.** Effects of geo-ecological conditions on larch wood variations in the North European part of Russia (Arkhangelsk region) // Journal of Forest Science, 2017. – Vol. 63(4). – P. 192-197. <https://doi.org/10.17221/102/2015-JFS> (Scopus)

7. **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> (Scopus)

8. Neverov N., Belyaev V., Chistova Z., Kutinov Y., Staritsyn V., Polyakova E., **Mineev A.**, Tyukavina O. Influence of morphometric parameters of relief on macro- and microstructure of wood *Pinus silvestris* L. in the North of the Russian Plain // Journal of Forest Science, 2019. – Vol. 65. – P. 79-85. <https://doi.org/10.17221/123/2018-JFS> (Scopus)

9. Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., **Минеев А.Л.**, Чистова З.Б. Цифровое моделирование рельефа в оценке вероятности развития эрозионных процессов в северных регионах страны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. – Т. 16. – № 1. – С. 95-104. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104> (Scopus)

10. Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., **Минеев А.Л.**, Чистова З.Б. 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-75-83> (Scopus)

Статьи в рецензируемых журналах из списка РИНЦ

11. Малов А.И., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беляев В.В., Гофаров М.Ю., Полякова Е.В., Старицын В.В., Дурынин С.Н., **Минеев А.Л.**, Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Ваганова Н.В., Морозов А.Н., Конечная Я.В. Фундаментальные основы экологически безопасных технологий освоения природных ресурсов Западно-Арктического сектора Российской Федерации. Ч. 2 // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика, 2014. – № 1(9). – 24 с.

12. **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, 2015. – № 3(21). – С. 278-291

13. **Минеев А.Л.**, Кутинов Ю.Г., Полякова Е.В., Чистова З.Б. Подготовка ЦМР и выбор геоморфометрических параметров для исследования экзогенных процессов северных территорий РФ // Природные ресурсы и комплексное освоение прибрежных районов Арктической зоны. Сборник научных трудов / Отв. редактор: В.И. Павленко, 2016. – С. 313-318

14. **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.

15. Кутинов Ю.Г., **Минеев А.Л.**, Чистова З.Б., Полякова Е.В. Цифровое моделирование рельефа северных арктических территорий РФ для геоэкологического районирования // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2018 год, 2018. – С. 78-89

16. 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>