

УДК 528.88

Минеев А.Л.*,
 Кутинов Ю.Г.**,
 Чистова З.Б.***,
 Полякова Е.В.****



А.Л. Минеев



Ю.Г. Кутинов



З.Б. Чистова



Е.В. Полякова

Геоэкологическое районирование территории Архангельской области с использованием цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий¹

*Минеев Александр Леонидович, научный сотрудник Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова РАН

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-3303-6520>

E-mail: alexander-l-mineev@j-spacetime.com; mineewal@gmail.com

**Кутинов Юрий Григорьевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова РАН, директор Центра космического мониторинга Арктики Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова,

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-1528-5910>

E-mail: yury-g-kutinov@j-spacetime.com; kutinov@fciarctic.ru

***Чистова Зинаида Борисовна, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова РАН

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-3794-6276>

E-mail: zinaida-b-chistova@j-spacetime.com; zchistova@yandex.ru

****Полякова Елена Викторовна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова РАН

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-9146-1141>

E-mail: elena-v-polyakova@j-spacetime.com; lenpo26@yandex.ru

Проведенный нами анализ находящихся в свободном доступе глобальных цифровых моделей рельефа ЦМР (GTOPO30, SRTM, SRTM Void Filled, GMTED2010, ACE2, ETOPO2 и ASTER GDEM) показал, что наиболее подходящей для северных территорий РФ является модель ASTER GDEM v2. На основе данной ЦМР и рассчитанных геоморфометрических параметров рельефа создан комплект геоэкологических карт и выделены на региональном и локальном уровнях районы различной интенсивности эрозионных и аккумулятивных процессов.

Ключевые слова: Архангельская область; глобальная цифровая модель рельефа; ASTER GDEM; SAGA GIS; геоморфометрические параметры; эрозионные процессы.

Введение

Цель данного исследования – проведение геоэкологического районирования на основе анализа протекания современных эрозионных и аккумуляционных процессов территории Архангельской об-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке ФАНО России в рамках темы АААА-А16-116061510010-2 «Разработка комплексной физико-геоэкологической количественной модели взаимодействия (литосфера, гидросфера, биосфера, атмосфера и, частично, ионосфера) в районах тектонических узлов севера Русской плиты и оценка их влияния на окружающую среду» и программы УрО РАН в рамках темы 15-15-5-17 «Отражение проявлений кимберлитового магматизма и зон глубинного нефтегазообразования в современном геодинамическом режиме Арктического сегмента земной коры».

ласти с использованием современных цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий.

В соответствии с целью исследования решались следующие задачи:

- 1) изучение возможности существующих цифровых моделей рельефа (ЦМР), находящихся в свободном доступе, и выбор из них модели, на основе которой можно было бы провести геоэкологическое районирование;
- 2) проведение сравнительного анализа наиболее распространенных геоинформационных систем (ГИС), их возможностей и методов обработки рельефа, и выбор оптимальной для расчета геоморфометрических параметров;
- 3) подготовка выбранной ЦМР для геоэкологического районирования территории, включая гидрологическую коррекцию;
- 4) выбор и расчёт геоморфометрических параметров рельефа, позволяющих на количественной основе проводить оценку современных эрозионных процессов и возможностей накопления загрязняющих веществ;
- 5) проведение на основе выполненных расчетов геоэкологического районирования территории Архангельской области.

Вариант решения первых четырех задач рассмотрен в работе авторов за 2015 г.¹

Осуществление всех видов деятельности, обеспечивающих недропользование в северотаежных районах Архангельской области, включая геологоразведочные, проектно-изыскательские, строительные, эксплуатационные работы, сталкивается с серьезными трудностями в силу 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.

Практически все факторы эрозионного процесса, в первую очередь, рельеф, характеризуются высокой пространственной изменчивостью и требуют при традиционном профильном подходе к оценке эрозионной опасности (в случае достаточно большой территории) увеличения числа расчетных профилей до практически нереального количества. Однако даже при этом невозможно учесть поперечную концентрацию склоновых потоков, способную существенно изменить пространственную картину распределения эрозионной опасности по территории и, в результате, – ее интегральную оценку. К тому же профильный подход не позволяет рассчитать обобщенные геоморфометрические индексы, такие как индекс расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index); общей водосборной (Catchment Area) и удельной водосборной площадей (Specific Catchment Area); топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index); индекс мощности эрозии (Stream Power Index); индекс потенциала плоскостной эрозии (LS Factor); индекс баланса геомасс (Mass Balance Index) и др.

В то же время, использование получивших в последнее время широкое развитие геоинформационных (ГИС) технологий и цифровых моделей рельефа (местности), 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 (аккумуляционный, эрозионный) и карт геоэкологического районирования территории.

При современном состоянии развития геоинформационных систем нет необходимости использовать изолинейные модели при геоморфометрических построениях. Эти построения могут успешно выполняться на цифровых растровых моделях.

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: оцифровка существующих топографических карт, спутниковая и авиационная стереосъемка (как оптическая, так и радиолокационная); воздушное лазерное сканирование. 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 современных космических аппаратов (например, WorldView-1,2,3, GeoEye-1 и т.д.), позволяет получать высотную информацию о рельефе и объектах поверхности с точностью до нескольких метров.

¹ 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.

Изготовление цифровой модели рельефа (ЦМР – DTM) основывается на «классических» стереофотограмметрических методах создания картографической продукции, используемых цифровые методы стереовизуализации пар космических снимков¹. 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 определяется разрешением исходных космических снимков, включающую в себя высоты точек рельефа местности, сформированную с учетом орографических линий.

Общая характеристика технологий создания ЦМР, их преимущества и недостатки приведены в таблице 1. Как видно из данных, приведенных в таблице, каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать при выборе оптимального способа создания ЦМР, в зависимости от конкретных целей использования данного типа информации.

Таблица 1

Технологии создания ЦМР²

Технология создания ЦМР	Цена за 1 кв. км	Оперативность получения информации	Горизонтальное разрешение, м	Вертикальное разрешение, м	Преимущества	Недостатки
Аэрометоды						
Лазерное сканирование	Чрезвычайно высокая	Низкая	1	0,1–1	– высокая точность; – превосходная технология для небольших участков, в том числе карьеров	– зависит от погодных условий; – требуется получения разрешения на совершение полета; – не создается изображение
Аэрофото-съемка	Высокая	Средняя	1	< 1–5	– оптимально для создания ЦМР на средние по площади территории; – также предоставляет ортотрансформированные снимки высокого разрешения	– зависит от погодных условий; – требуется получения разрешения на совершение полета
Аэрофото-съемка/SAR	Высокая	Средняя	5	1–5	– возможна съемка земной поверхности сквозь облака – создание ЦМР на средние по площади территории	– на съемку влияют неблагоприятные погодные условия
Космические методы						
Оптические данные сверхвысокого разрешения	Средняя	Высокая	2–10	2–10	– высокая точность	– на съемку влияют облачность и атмосферная дымка, что особенно важно для северных территорий РФ
Радарная космическая съемка	Низкая	Чрезвычайно высокая	5–10	5–15	– наиболее оперативный и дешевый способ при создании ЦМР на территории стран и крупных регионов; – съемка больших площадей; – всепогодная съемка	– эффективная технология съемки для больших площадей и менее пригодная для съемки небольших участков
Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	Свободно распространяемые данные	Только архивные данные	90	5–16 (данные на отдельные горные области отсутствуют)	– бесплатный источник информации на практически любой участок земной поверхности	– данные более чем десятилетней давности; – пространственное разрешение зачастую недостаточно для решения многих задач; – отсутствие данных на отдельные участки

¹ Компания «Совзонд» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sovzond.ru>.

² По: [Antifaev J.]. Мониторинг чрезвычайных ситуаций с применением радарной космической съемки // Геоматика. 2013. № 3. С. 36–40, с добавлениями. Первоисточник см.: Antifaev J. "Empowering Broad-Area Disaster: SAR Complements LiDAR Data To Enable Effective National-scale Coverage for Disaster Planning and Mitigation." *Earth Imaging Journal* (May/June 2013): 32–35. PDF-file <<http://eijournal.com/wp-content/uploads/2013/05/Empowering.pdf>>.

Обычно изучение рельефообразующих процессов в большинстве работ связано в основном с хозяйственным освоением территорий, и лишь небольшое количество работ посвящено проявлению эрозионных процессов в практически не затронутых антропогенной деятельностью северотаежных ландшафтах¹. Учитывая площадь лесного покрова исследуемого региона (29540,9 тыс. га, 65% территории) и ожидаемое освоение территории, вопрос этот имеет приоритетное значение.

Считается, что в естественных северотаежных ландшафтах Севера Русской плиты, эрозионные процессы протекают достаточно медленно и находят слабое отражение в формах рельефа. Однако ситуация коренным образом меняется при нарушении целостности растительного покрова в результате хозяйственного освоения территорий. Кроме того, глобальные изменения температуры, особенно ярко проявляющихся в высоких широтах, зачастую могут являться первопричиной или триггером развития различных генетически связанных эрозионных процессов.

1. Характеристика региона исследований

Архангельская область, с учетом ее площади (413,1 тыс. кв. км, удельный вес территории в общей территории РФ – 2,4%, без Ненецкого автономного округа), протяженности, природных богатств, климатических особенностей и ряда других факторов, является уникальной территорией России. Занимая практически весь Европейский Север страны, она протягивается с запада на восток от Карелии до Уральских гор и с юга на север – от средневропейской полосы до самой северной точки России – Земли Франца Иосифа, охватывая практически все основные геолого-географические и биоклиматические типы формирования природных комплексов во всем их многообразии от типичной тундры до типичных ландшафтов средней полосы России (рис. 1, А).

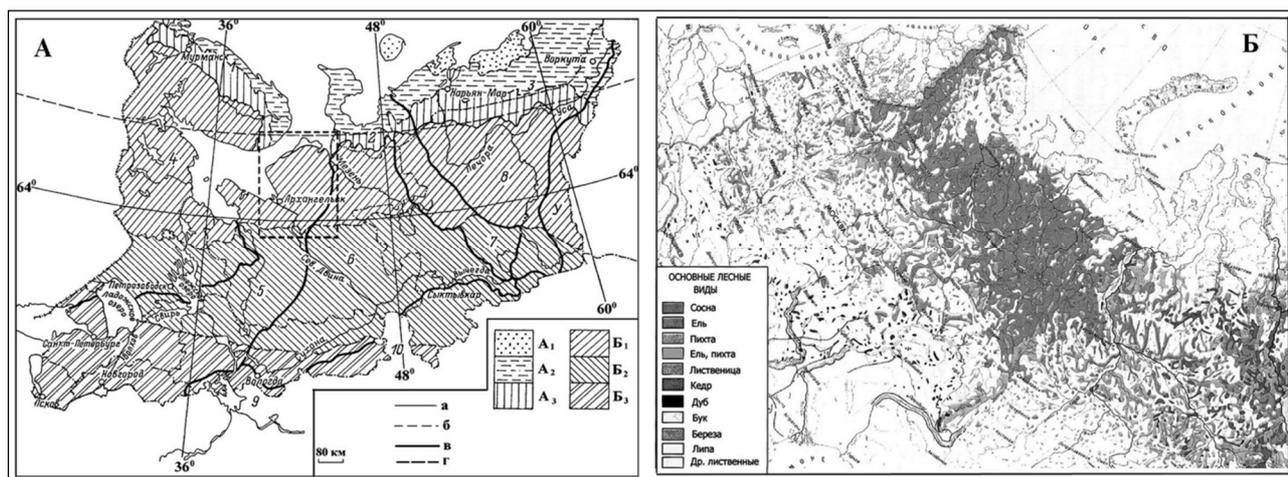


Рис. 1. Ландшафтное районирование Европейского Севера России² и структура лесного покрова³.

Границы: а – зон, б – подзон, в – провинций, г – района исследований. Зоны и подзоны:

А – зона тундры и лесотундры (субарктическая) с подзонами (А₁ – типичная тундра, А₂ – южная тундра, А₃ – лесотундра); Б – зона тайги с подзонами (Б₁ – северная тайга, Б₂ – средняя тайга, Б₃ – южная тайга); В – зона подтайги. Ландшафтные провинции. Зона тундры и лесотундры: 1 – Кольская, 2 – Канинско-Тиманская, 3 – Печорская. Зона тайги: 4 – Кольско-Карельская, 5 – Северо-Западная, 6 – Двинско-Мезенская, 7 – Тиманская, 8 – Печорская, 9 – Верхневолжская, 10 – Северных Увалов. Зона смешанных лесов: 11 – Северо-Западная. У – Уральская горная страна;

Б – Преобладающие виды лесной растительности на территории северо-запада России и Западной Сибири⁴.

Разнообразие природных зон, большие лесные массивы, речные системы (в среднем 0,53 км на 1 кв. км площади), болота (14,28% ее площади) арктическое побережье дают возможность для проведения широкомасштабных сопоставительных исследований, результаты которых могут быть с достаточной достоверностью распространены на территорию большей части России.

¹ Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. Автореф. дисс. ... д. геогр. наук. М., 1999. 32 с.; Евсеева Н.С. Современные процессы рельефообразования юго-востока Западно-Сибирской равнины. Автореф. дисс. ... д. геогр. наук. Томск, 2006. 43 с.

² Исаченко А.Г. Физико-географическая характеристика региона // Состояние окружающей среды Северо-Западного и Северного регионов России. СПб.: Наука, 1995. С. 7-30.

³ Lausala T., Valconen L., eds. *Economy Geography and Structure of the Russian Territories of the Barents Region*. Rovaniemi: Arctic Centre University of Lapland, 1999. 250 p.

⁴ Ibid.

Архангельской области присущи следующие характерные черты, влияющие на выбор методик обработки ЦМР¹:

- моноклиналиное залегание пород осадочного чехла с малыми углами (как правило, в пределах одного градуса) падения;
- существует мнение, что после валдайского оледенения рельеф не достиг той стадии «зрелости», когда в нем проявляются тектонические нарушения фундамента и осадочного чехла. Проведенные ранее авторами исследования показывают, что тектонические нарушения территории достаточно отчетливо выражены в современном рельефе, несмотря на его слабую расчлененность и «молодость», обусловленные широким распространением отложений валдайского оледенения и большой мощностью перекрывающих четвертичных отложений (40–200 м);
- в целом северо-восток Европейской части России, к которому относится и территория Архангельской области, характеризуется небольшими абсолютными значениями высот и слабой расчленённостью 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 м (и более)². Крупнейшие географические таксоны региона представлены низменностями: Мезенской, Северодвинской и Онежской; крупнейшие приподнятые равнины – Онежским полуостровом, Беломоро-Кулойским плато. Структурно-денудационный тип рельефа, как правило, развит на поверхностях пластовых равнин, формирующихся на горизонтально или полого-моноклиналино залегающих осадочных породах позднего протерозоя (венд) или палеозоя (карбон, пермь). Это плоско-волнистые субгоризонтальные или полого-наклонные равнины и плато или пологосклонные возвышенности, расчлененные эрозией (Беломорско-Кулойское плато, Онежский полуостров). Среди них выделяются низменные (до 100 м) и возвышенные (более 200 м) равнины;
- широкое распространение лесного покрова исследуемого региона (площадь 29540,9 тыс. га, 65% территории) (рис. 1, Б), что затрудняет использование высокоточных цифровых моделей рельефа (ЦМР), т.к. вносит погрешность за счет высоты лесного покрова (на 65% территории практически в виде постоянной величины – высоты древостоя). Для среднемасштабных ЦМР это влияние значительно меньше и его можно избежать, используя относительные, а не абсолютные значения высот рельефа ЦМР. К тому же средняя высота древостоя сопоставима с величиной точности среднемасштабных ЦМР;
- учитывая площадь исследуемого региона (413,1 тыс. кв. км без НАО) и равнинный характер рельефа наиболее оптимально использование цифровых моделей, как минимум, уровня DTED-2. Среднемасштабные цифровые модели рельефа для равнинных территорий, к которым относится и исследуемый район, как правило, созданы по нерегулярной сети высотных отметок и характеризуются значительным количеством артефактов, особенно в областях распространения сильно врезанных долин.

2. Геоэкологическое районирование территории по степени развития эрозионных процессов

Принципы геоэкологического районирования и авторское определение геоэкологических структур достаточно подробно изложены авторами в более ранних работах. Выбор цифровой модели рельефа (ЦМР), программных средств для их обработки (SAGA GIS), методики подготовки гидрологически корректной ЦМР на основе ASTER GDEM v.2. и расчета геоморфометрических параметров рельефа детально изложены в одной из работ авторов³. В целом алгоритм методики подготовки корректной цифровой модели рельефа и комплекта монофакторных карт параметров рельефа для геоэкологического районирования территории показан на рис. 2.

¹ По: 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 т. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 390 + 272 + 472 с.

² По данным сайта Геологической службы США: "EarthExplorer." *U.S. Geological Survey (USGS)*. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, n.d. Web. 3 Feb. 2016 <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>.

³ Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Указ. соч..

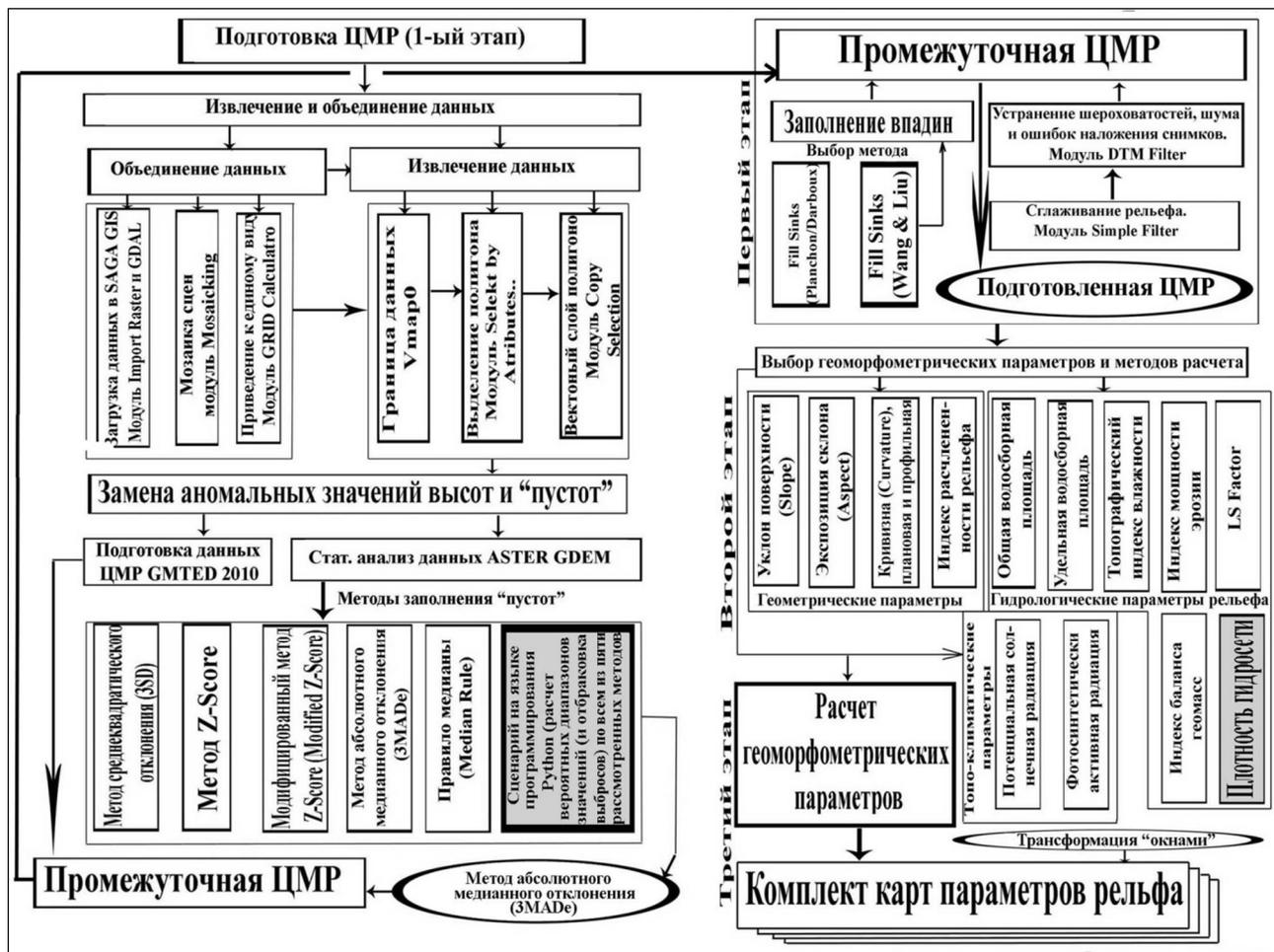


Рис. 2. Алгоритм методики подготовки корректной цифровой модели рельефа на основе ЦМР ASTER GDEMv2 с использованием программного обеспечения ГИС SAGA для расчета геоморфометрических параметров и создания комплекта карт состояния окружающей среды¹. Цветом выделены авторские сценарии выбора метода выделения участков с аномальными высотами и расчета плотности гидросети.

2.1. Проверка корректности подготовленной ЦМР

Для определения применимости полученных результатов и выделения региональных и локальных закономерностей были отстроены карты высот и геоморфометрических параметров (размер ячейки 30×30 м, ~1" – исходная модель). Для более четкого выделения разноранговых структур и неоднородностей рельефа исходные поля подвергались дальнейшей обработке, заключающейся в выделении их региональной и локальной составляющих различными окнами фильтрации – 480×480 м (~15"×15"), 960×960 м (~30"×30") и 1920×1920 м (~60"×60") и кластерном анализе с различным количеством классов. Кроме пространственного распределения параметров, была проведена статистическая обработка материала для оценки их доли в общей площади исследований. Для сопоставления материалов были использованы карты ЦМР и геоморфометрических параметров Беломорско-Кулойского плато (ячейка 20×20 м)², построенные с использованием топографических карт масштаба 1:200000 и ГИС GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) (рис. 2, I).

Анализ цифровых моделей рельефа с использованием разных окон показал тождественность пространственного распределения высот.

Также было проведено сопоставление подготовленной ЦМР с геоморфологической картой региона (рис. 3, II) и проведено сравнение исходной ЦМР ASTER GDEM v2 с подготовленной моделью. Для этого был проведен расчет углов наклона по исходной модели и подготовленной ЦМР (рис. 3, III).

Для проверки точности ЦМР Архангельской области использовались открытые векторные данные ГИС Панорама, полученные оцифровкой топокарт масштаба 1:50 000.

¹ Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Указ. соч.

² Гофаров М.Ю., Болотов И. Н., Кутинов Ю. Г. Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров. Екатеринбург: УрО РАН. 2006. 167 с.

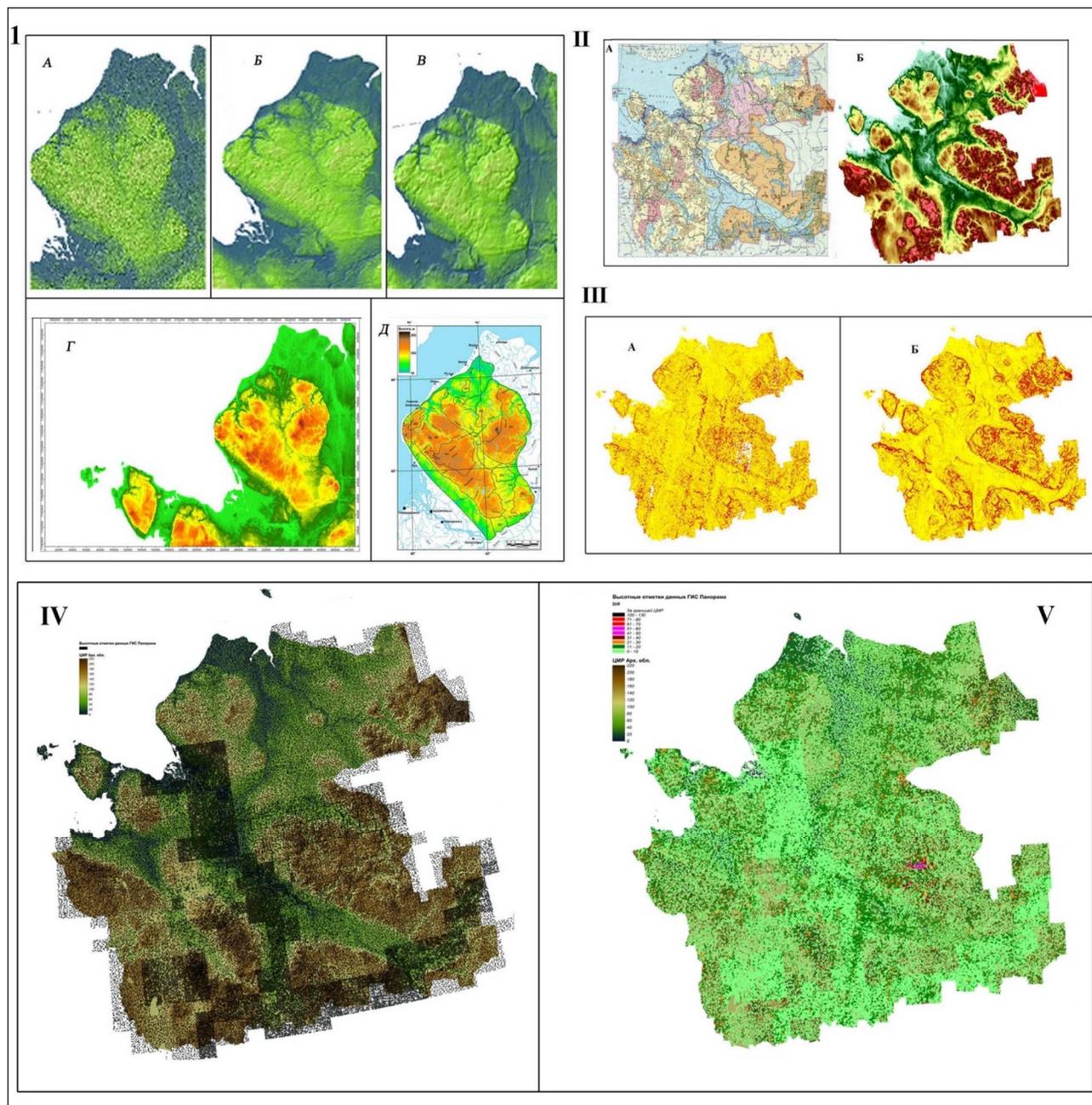


Рис. 3. Результаты проверки корректности подготовленной ЦМР:

I – сопоставление ЦМР с моделью рельефа Беломорско-Кулойского плато:

А-В – подготовленная ЦМР: А – с окном 1"×1", Б – 16"×16", В – 32"×32";

Г – искусственно загрубленная модель;

Д – модель рельефа Беломорско-Кулойского плато (20×20 м)¹;

II – сопоставление геоморфологической карты² региона (А) с подготовленной ЦМР (Б);

III – результат сравнения моделей по рассчитанным углам наклона³:

А – исходная ASTER GDEM v2;

Б – подготовленная ЦМР;

IV – точечные объекты, извлеченные из данных ГИС панорама для проверки точности ЦМР Архангельской области;

V – территориальное расположение высотных отметок с различной разностью по высоте.

¹ Там же.

² Атлас Архангельской области. М.: ГУНиО МО. 1976. 72 с.

³ Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Указ. соч.

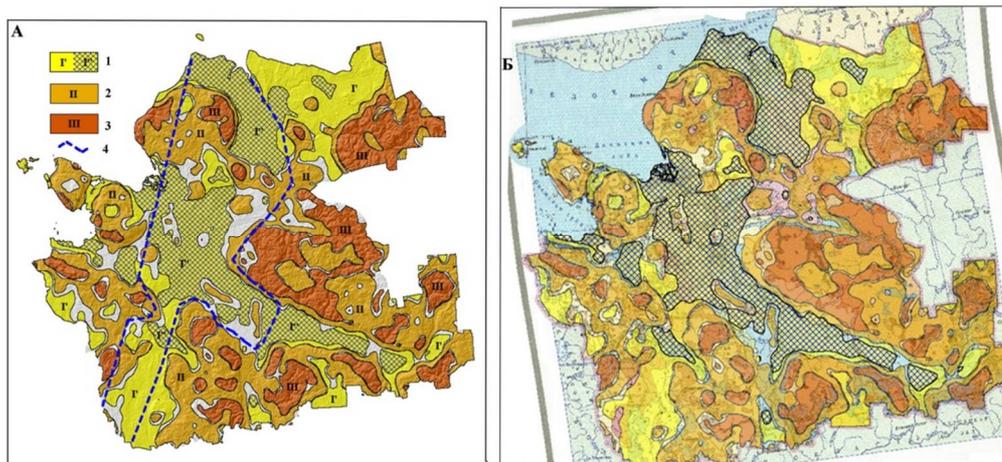


Рис. 10. Схема сопоставления материалов. А – Районирование территории Архангельской области на основе кластерного анализа значений углов наклона, LS-фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности; 1 – зона I: озерно-ледниковые и озерные равнины, предрасположенные к аккумулятивным процессам и 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 камовым¹ (с развитием карста) типами рельефа, сильно предрасположенные к развитию эрозионных процессов; 4 – секущая зона карста порода; Б – сопоставление с геоморфологической картой² Архангельской области.

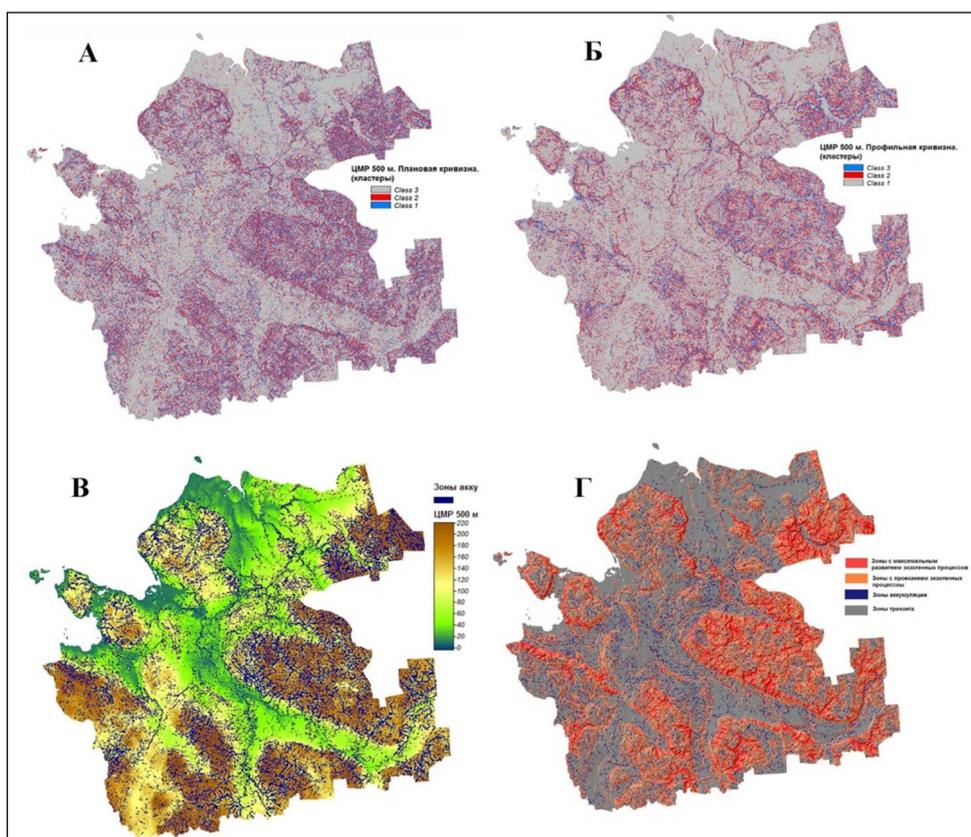


Рис. 12. Выделение зон аккумуляции и транзита материала. Три кластера на ЦМР с ячейкой 500 м: А – плановой кривизны: кластер 1 представляет «вогнутые участки»; кластер 2 – «выпуклые»; кластер 3 – «плоские»; Б – профильной кривизны: кластер 3 определяет «вогнутые участки»; кластер 2 – «выпуклые»; кластер 1 – «плоские»; В – зоны аккумуляции; Г – геоэкологическое районирование территории Архангельской области по интенсивности протекания эрозионных и аккумулятивных процессов.

¹ Камы (ед. число – кам) называются небольшие холмы от 5 до 40 м относительной высоты, расположенные обычно группами, редко одиночно. Между ними находятся понижения в виде котловин, часто занятых озерами, или в виде неглубоких долин-лабиринтов. Форма холмов овальная, округлая или неправильная, но контуры всегда закругленные. Располагаясь группами, холмы образуют камовый рельеф.

² Атлас Архангельской области...

Для проверки точности ЦМР Архангельской области использовались открытые векторные данные ГИС Панорама, полученные оцифровкой топокарт масштаба 1:50 000. Данные ГИС Панорама распространяются в формате SXF, разработанном в 1992 г. специалистами Топографической Службы ВС РФ и в 1993 г., утвержденном в качестве основного обменного формата цифровой информации о местности в Вооруженных Силах РФ и ряде служб Российской Федерации¹.

SAGA GIS не позволяет напрямую считывать данные формата SXF, поэтому для конвертации данных ГИС Панорама в формат SHAPE была применена ГИС Quantum GIS. Данные ГИС Панорама на Архангельскую область включают в себя около 770 векторных слоев (каждый из которых соответствует номенклатурному листу топокарты), поэтому для обработки такого большого набора данных авторами была написана программа на языке программирования Python, использующая модули QGIS.

В результате запуска программы были получены векторные слои формата SHAPE, содержащие точечные объекты с координатами и значениями высоты. Полученные слои были импортированы и «сшиты» средствами SAGA GIS. Всего было извлечено 69048 точечных объектов, из которых 62548 объектов попало в границы Архангельской области (рис. 3, IV).

В таблице 2 представлен отчет, полученный в ходе анализа разности высот между данными оцифрованных топокарт и данными цифровой модели рельефа Архангельской области. Из таблицы видно, что в большинстве высотных отметок (~74%) абсолютная разность по высоте не превышает 10 метров, в остальных случаях разность достигает 20 м (~24%).

Таблица 2

Анализ значений абсолютной разности высотных отметок рельефа

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

В таблице 3 представлен статистический анализ полученных данных.

Таблица 3

Статистический анализ

Среднее арифметическое разности	7,45 м
Стандартное отклонение	5,62 м
Максимальная разность	126,71 м (1 высотная отметка)
Минимальная разность	0 м
Всего рассмотрено высотных отметок	62 548

На рисунке 3, V показано территориальное расположение высотных отметок с различной разностью по высоте.

Таким образом, на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) ASTER GDEMv2 с использованием программного обеспечения ГИС SAGA создана корректная ЦМР территории Архангельской области для количественной оценки морфологии рельефа и специфики эрозионных процессов. Сопоставление созданной ЦМР с ЦМР Беломорско-Кулойского плато, геоморфологической картой Архангельской области и высотными отметками с топокарт показало ее достаточно высокую точность и применимость для дальнейшего геоэкологического анализа.

2.2. Выбор морфометрических параметров рельефа и их обработка

Учитывая достаточно большое количество и многообразие используемых геоморфометрических параметров, одной из задач данного исследования был выбор параметров и методик их расчета для геоэкологического анализа (рис. 2).

¹ Программное изделие геоинформационная система «Панорама X64» (ГИС Панорама) Форматы и спецификации данных. Векторный формат SXF. Структура данных в двоичном виде ПАРБ.00227-01 99 02. 2017. [Электронный ресурс] // КБ ПАНОРАМА. Режим доступа: <http://gistoolkit.ru/download/doc/sxf4bin.pdf>. С. 2.

Для тестовых вычислений параметров нами была создана упрощенная теоретическая ЦМР с использованием функции

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

Тестовые вычисления были также проведены для территории Онежского полуострова, который был выделен как тестовый участок по следующим причинам: относительно небольшая замкнутая площадь при достаточно хорошо выраженном рельефе; наличие протерозойских и палеозойских отложений; наличие тектонических структур (рифейский Онежский грабен и вендский Унский грабен), выраженных в рельефе; наличие водораздела.

Такие же расчеты по упрощенной теоретической ЦМР и территории Онежского полуострова были проведены и для всех геоморфометрических параметров для выбора оптимальных. Пример расчета приведен на рис. 4.

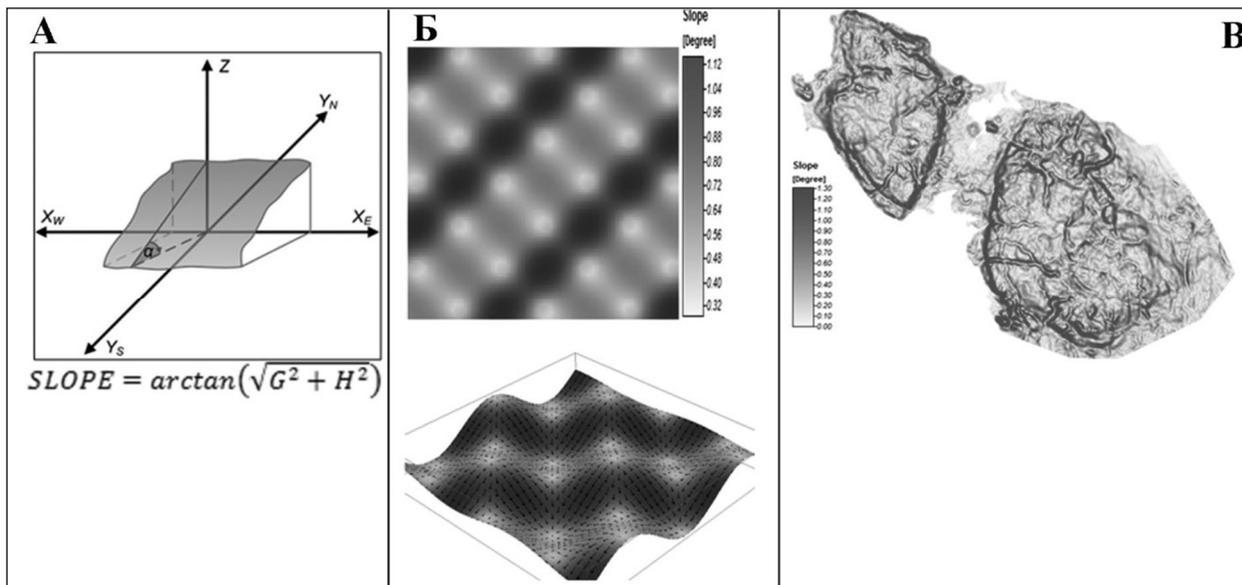


Рис. 4. Пример расчета угла наклона поверхности: А – угол наклона и формула расчета; Б – расчет угла наклона по теоретической ЦМР; В – расчет угла наклона по реальной ЦМР.

Формулы расчета основных параметров представлены в табл. 4.

Таблица 4

Формулы расчета основных параметров рельефа, примененных в исследовании

Параметр	Формула	Параметр	Формула
Уклон поверхности (Slope)	$SLOPE = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2})$	Экспозиция склонов (Aspect)	$ASPECT = 180^\circ - \arctan\left(\frac{H}{G}\right) + 90^\circ \times \left(\frac{G}{ G }\right)$
Кривизна (Curvature)	Горизонтальная, вертикальная (отдельные формулы приведены в рис. 5)	Индекс расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index)	$TRI = \sqrt{\sum (h_{0,0} - h_{i,j})^2}$
Водосборная площадь	$f_i = \frac{\max(0, Slope_i^p)}{\sum_{j=1}^8 (\max(0, Slope_j^p))}$	Топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index)	$TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan(\beta)}\right)$
Индекс мощности эрозии (Stream Power Index)	$SPI = A \cdot \tan(\beta)$	Индекс потенциала плоскостной эрозии (LS Factor)	$LS = \left(\frac{As}{22.13}\right)^m \times \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^n$
Индекс баланса геомасс (Mass Balance Index)	$MBI = \begin{cases} f(TC) \times (1 - f(S)) \times (1 - f(VDN)), & \text{для } f(TC) < 0 \\ f(TC) \times (1 + f(S)) \times (1 + f(VDN)), & \text{для } f(TC) > 0 \end{cases}$ $f(x) = \frac{x}{ x + F}$	Фотосинтетически активная радиация (ФАР)	$\Phi AP = 0.42 \cdot S + 0.60 \cdot D$

Для выбора типов кривизн для расчета нами было проведено их сопоставление как по упрощенной теоретической ЦМР, так и по реальной территории Онежского полуострова. Пример сопоставления приведен на рис. 5.

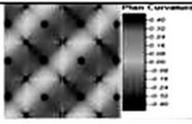
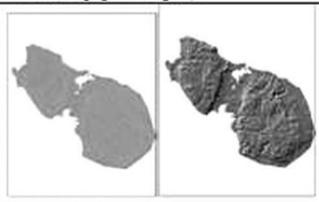
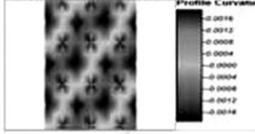
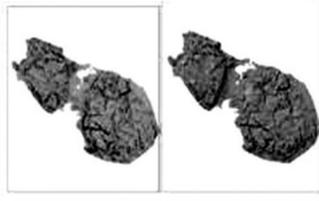
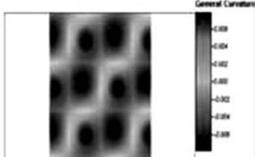
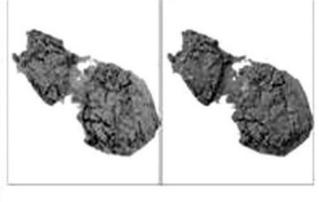
Горизонтальная кривизна: (+) расхождение, (форма - выпуклость, бугор, вал, поднятие); (-) схождение, (форма - вогнутость, яма, канава, опускание(борозда)).			
Название	Формула расчета	Расчет кривизн по теоретической ЦМР	Расчет реальной ЦМР (слева – карта значений кривизны, справа – наложенная на отмытку рельефа.)
Plan Curvature - Плановая кривизна (общий тренд для больших окон)	$PlanC = -\frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)^{1.5}}$		
Вертикальная кривизна. Возможность: (+) сноса; (-) накопления. Узкие, протяженные объекты (русла рек и водотоки)			
Profile Curvature - Профильная кривизна (локальный тренд)	$ProfC = -\frac{(2DG^2 + 2EH^2 + 2FGH)}{(G^2 + H^2)(1 + G^2 + H^2)^{1.5}}$		
Обобщенная кривизна, изменение отношения 1/r в горизонтальном направлении и вертикальном направлении (для обобщения информации о кривизне земной поверхности в обоих направлениях)			
General Curvature - Общая кривизна (для региональной оценки всей площади)	$GC = -2(2D + 2E) = -4(D + E)$		

Рис. 5. Пример сопоставления типов кривизн

В результате проведенного анализа, для расчета по всей территории Архангельской области, были выбраны поперечная (горизонтальная) и продольная (вертикальная) кривизны. Для применения кластерного анализа – выбраны профильная и плановая кривизны. Также было проведено выделение форм рельефа по классификации Треха¹.

Для уменьшения локальной составляющей, нами применялся фильтр сглаживания (Smooth) из модуля Simple Filter, как наиболее «щадящий» из фильтров в ГИС SAGA.

В процессе исследования были получены карты следующих параметров: уклонов поверхности (Slope); экспозиции склонов (Aspect); кривизн (Curvature); индекса расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index); общей водосборной (Catchment Area) и удельной водосборной площадей (Specific Catchment Area); топографического индекса влажности (Topographic Wetness Index); индекса мощности эрозии (Stream Power Index); индекса потенциала плоскостной эрозии (LS Factor); индекса баланса геомасс (Mass Balance Index); потенциальной солнечной радиации (Potential Incoming Solar Radiation); фотосинтетически активной радиации (ФАР); плотности гидросети (по созданному нами алгоритму²).

¹ Troeh F.R. "Landform Parameters Correlated to Soil Drainage." *Soil Science Society of America Proceedings* 28.6 (1964): 808–812.

² Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Указ. соч.

2.3. Генерализация данных

При анализе рельефа необходима точная регистрация либо размеров контуров, либо их площадей. 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 всегда должна преследовать две цели: во-первых соблюсти по возможности геометрическую точность изображения, во-вторых, сохранить содержательное соответствие. Эти цели находятся в диалектическом противоречии, поскольку геометрическая точность нередко нарушается в угоду содержательному соответствию¹. 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 рельефе², представляющем первоочередной интерес при экологических исследованиях. При этом, как правило, уменьшается размер эрозионных долин и увеличивается площадь плоских водоразделов. С учетом слабоборасчлененного характера рельефа исследуемой территории и точности высотного определения по используемой ЦМР ряд локальных эрозионных форм вообще не найдет своего отражения.

Некоторые морфометрические величины сильно зависят от масштаба (шага решетки, матрицы высот), другие менее сильно; этот вопрос изучался в ряде работ³. Например, средняя по региону крутизна склонов существенно зависит от шага решетки, в то время как максимальное по матрице значение площади сбора МСА слабо зависит от него (т.е. от масштаба) (рис. 6, А).

В общей тенденции, средняя по местности крутизна возрастает с уменьшением шага решетки⁴ (рис. 6, Б).

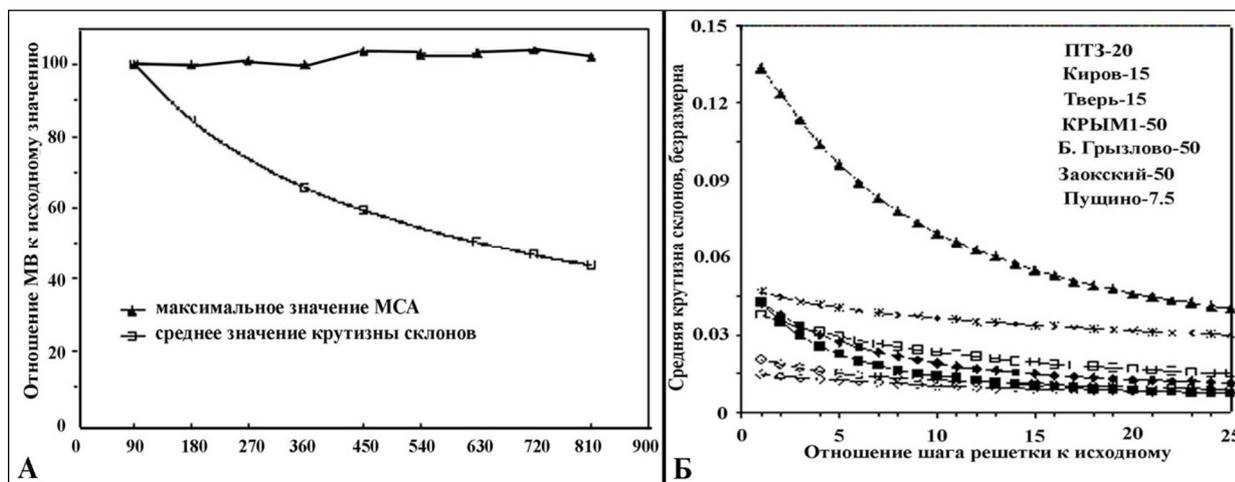


Рис. 6. Сравнение зависимости морфометрических величин: А – максимального значения площади сбора МСА и средней по той же местности крутизны от шага решетки⁵; Б – средней по местности крутизны от шага решетки для семи территорий⁶. Исходный шаг решетки указан после названия местности.

Как указывалось ранее, при расчетах в окне 960×960 м диапазон значений высоты на территории Архангельской области составил [0; 458] м. В окне 1920×1920 м – [0; 437]. В окне 30×30 м (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 м. В окне 1920×1920 м – [0; 2,71]. В окне 30×30 м (разрешение ASTER GDEM) – [0; 3,45].

¹ Берлянд А.М. Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 240 с.

² Там же.

³ 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.; Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. "Fundamental Quantitative Methods of Land Surface Analysis." *Geoderma* 107.1-2 (2002): 1–32; Idem. "The Problem of Scale-specific and Scale-free Approaches in Geomorphometry." *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 28.1 (2005): 81–101.

⁴ Ibid.

⁵ Ibid.

⁶ Ibid.

Учитывая то обстоятельство, что высота, угол наклона склонов применяются при расчете большинства геоморфометрических параметров, то при увеличении ячейки («окна») значения этих параметров будут уменьшаться. В то же время анализ цифровых моделей рельефа с использованием разных окон показал тождественность пространственного распределения высот (рис. 3).

На растровых ЦМР различного разрешения множество геоморфометрических параметров будут иметь различные значения и, следовательно, выделять различные объекты. Если размер ячейки достаточно мал (несколько сантиметров), 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.

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. 7).

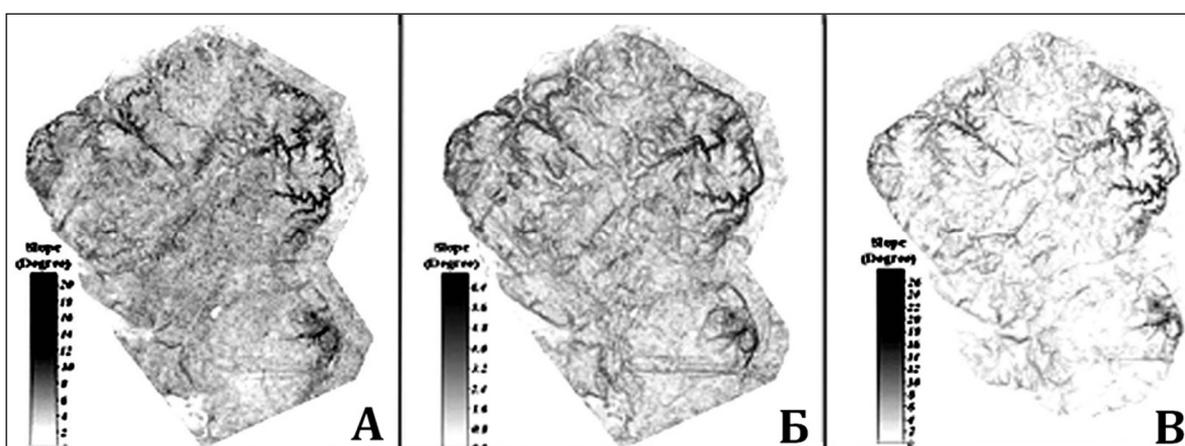


Рис. 7. Расчёт углов наклона на разных ЦМР: А – ASTER GDEMv2 (ячейка 90 м), диапазон значений от 0 до 20°; Б – ASTER GDEMv2 (ячейка 500 м), диапазон значений от 0 до 6,4°; В – ЦМР, оцифрованная из данных ГИС Панорама (ячейка 90 м), диапазон значений от 0 до 26°.

На рисунке 7 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. 8).

Для рисунка 8, А диапазон значений этого класса составил [5; 20], для рисунка 8, Б – [2; 6,4], для рисунка 8, В – [5; 26]. Хотя абсолютные значения внутри классов достаточно разные, сами классы, как видно из рисунка 8, характеризуют те же самые склоны.

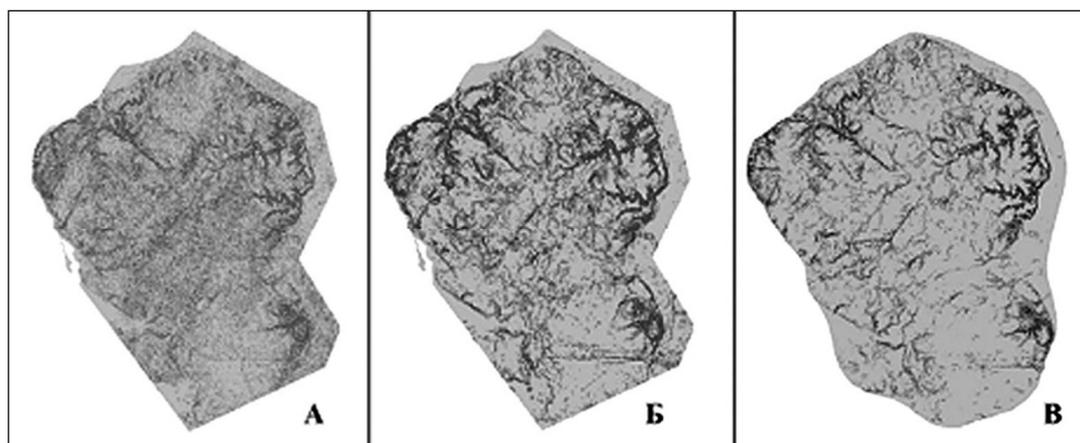


Рис. 8. Классы углов наклона на разных ЦМР: А – ASTER GDEMv2 (ячейка 90 м); Б – ASTER GDEMv2 (ячейка 500 м); В – ЦМР, оцифрованная из данных ГИС Панорама (ячейка 90 м).

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)¹. 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 данных².

Значение, которое характеризует кластер, еще называют центром кластера.

Наиболее популярный метод кластеризации k-means (k-средних) основан на итеративном перемещении значений между кластерами. Метод k-средних чаще служит как способ количественной и качественной оценки набора данных, чем как способ деления набора на уникальные, конечные группы. Еще одна роль метода k-средних – это снижение сложности данных³.

Существует несколько алгоритмов реализации метода k-средних. В общем случае алгоритм состоит из следующих шагов⁴:

- а) выбрать начальные центры k кластеров;
- б) соотнести каждый элемент выборки с ближайшим центром кластера;
- в) вычислить новые значения центров каждого кластера, исходя из разделения, произведенного на предыдущем шаге;
- г) повторять шаги 2 и 3 до тех пор, пока разделение 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:

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

где k – количество кластеров, n – количество точек, $dist$ – метрика близости.

В SAGA GIS применяется алгоритм метода k-средних автора Forgy, использующий другую формулу⁵:

$$\sum_{i=1}^k \int p(x) dist(c_i, x_{ij}) dx, \quad (2)$$

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.

¹ Faber V. "Clustering and the Continuous k-Means Algorithm." *Los Alamos Science* 22 (1994): 138–144.

² Кластерный анализ [Электронный ресурс] // Интернет-сайт компании StatSoft Russia. Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stcluan.html>.

³ Morissette L., Chartier S. "The k-Means Clustering Technique: General Considerations and Implementation in Mathematica." *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology* 9.1 (2013): 15–24.

⁴ 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* 55.3 (2013): 307–314.

⁵ *Ibid.*

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 (рис. 9, А) и реальной ЦМР (рис. 9, Б, В).

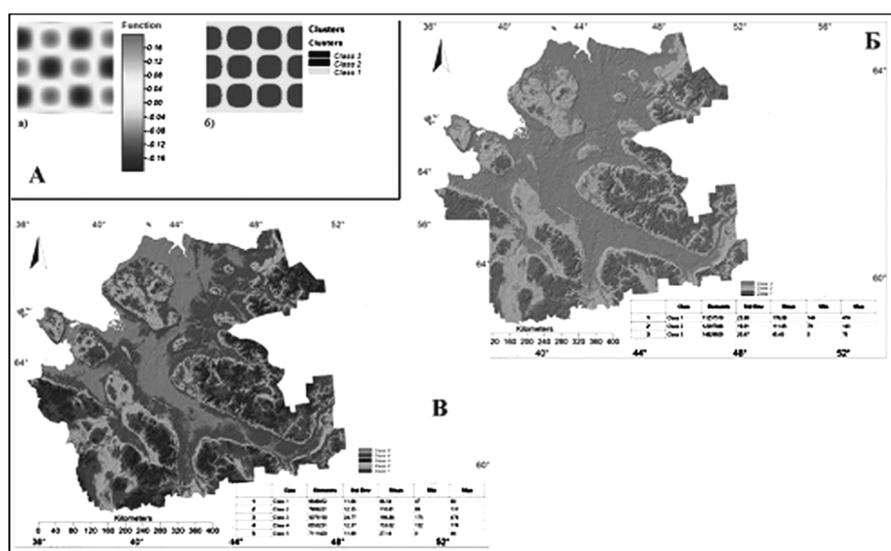


Рис. 9. Пример выполнения кластерного анализа на имитационной и реальной ЦМР. А – кластерный анализ имитационной ЦМР: а) ЦМР, созданная с помощью функции $z = \sin(x)\cos(x)$; б) три кластера; Б – кластерный анализ подготовленной ЦМР с разбиением на 3 класса; В – кластерный анализ подготовленной ЦМР с разбиением на 5 классов.

На рис. 9, А 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 (табл. 5).

Таблица 5

Статистика кластеров имитационной ЦМР

Номер кластера	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

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 (рис. 3) с ЦМР рассчитанными при помощи кластерного анализа (рис. 10 Б, В, цветная вкладка, с. 274) показывает, что в последнем случае выделение не только общего тренда, но и границ проявления эрозионных процессов более наглядно и корректно.

2.4. Геоэкологическое районирование исследуемой территории по степени развития эрозионных процессов

Как указывалось ранее, 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 Трё-

ха); 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).

Таким образом, был получен 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.

В силу того, что цифровая модель рельефа территории Архангельской области имеет довольно большую плотность ячеек (например, при размере ячейки около 90×90 м общее количество ячеек составляет 38 353 232), любые выделяемые с помощью кластерного анализа зоны, характеризующиеся порядком значений того или иного геоморфометрического параметра, имеют прерывистые или даже сильно «раздробленные контуры».

Геоэкологическое районирование территории на основе кластерного анализа углов наклона, LS-фактора, индекса расчлененности рельефа и индекса влажности 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 и были 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;
- 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;
- на *четвертом этапе* с помощью кластерного анализа значений плотности бессточных впадин была выделена секущая зона, совпадающая с областью распространения карстующихся пород. Эта зона выделяется по кластеру повышенной плотности впади;
- на *пятом этапе* по каждой из полученных зон районирования (рис. 10 А, цветная вкладка, с. 274) были посчитаны средние значения различных геоморфометрических параметров (табл. 6), чтобы можно было дать характеристику протекающих в каждой из зон процессов;
- на *шестом этапе* полученная карта районирования (рис. 10 А, цветная вкладка, с. 274) сопоставлялась с геоморфологической картой Архангельской области (рис. 10 Б, цветная вкладка, с. 274).

Таблица 6

Средние значения геоморфометрических параметров
внутри каждой из зон

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, ×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

Характеристика выделенных зон районирования, полученных в результате сопоставления рис. 10 А, Б (цветная вкладка, с. 274) и таблицы 6, дана в таблице 7.

Таблица 7

Характеристика выделенных зон

Зона	Геоморфология (рис. 10 А)	Геморфометрия (рис. 10 Б, табл. 6)
I	<p>На юго-востоке области этой зоне характерен водно-ледниковый и озерный аккумулятивный тип рельефа – это озерно-ледниковые и озерные 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.</p> <p>На северо-западе и юго-западе области водно-ледниковый аккумулятивный тип рельефа представлен также холмисто-котловинным камовым рельефом.</p>	<p>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 прогреваемые (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 плоские и волнистые моренные равнины, местами абрадируемые 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).</p> <p>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>Территории, служащие источниками сноса материала (плато, плоская, но возвышенная территория), местами слабохолмистые, местами бронированные известняками.</p> <p>Этой зоне характерны умеренно увлажненные и умеренно прогреваемые (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 плоские и волнистые моренные равнины, местами абрадируемые 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>Территории максимального развития эрозионных процессов (крупные изрезанные склоны).</p> <p>Этой зоне характерны повышенные, наименее увлажненные и наиболее прогреваемые (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>

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 7).

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. Е.В. Шаврина и соавт.¹, 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

¹ Шаврина Е.В., Малков В.Н., Гуркало Е.И. Особенности развития карста в Архангельской области [Электронный ресурс] // Северный Спелео Альманах. 2007. № 7. Режим доступа: http://www.nordspeleo.ru/cca/cca_7/index.htm.

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)¹. 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.

На региональном уровне основными зонами аккумуляции твердых осадков являются долины крупных рек региона: Онеги, Северной Двины, Мезени, Пинеги (поймы, речные террасы). Анализ водосборных 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 по следующим параметрам: площадь бассейна, общая длина водотоков, среднее значение индекса влажности, среднее значение индекса расчлененности рельефа, среднее значение LS фактора (таблица 8).

Таблица 8

Сравнение водосборных бассейнов крупных рек Архангельской области

Характеристики	р. Онега	рр. Сев. Двина и Вычегда	р. Пинега	р. Мезень
Площадь, кв. км	51 654	103 964	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

Судя по средним значениям LS фактора, в бассейнах рек Пинеги и Северной Двины в большей степени 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 на водосборных бассейнах рек Онеги и Мезени преобладают процессы накопления, а на площади бассейнов Северной Двины и Пинеги в большей степени развиты процессы смыва и транзита при общей закономерности аккумуляции сносимого материала.

На более детальном уровне была создана карта геоэкологического районирования территории Архангельской области по интенсивности протекания эрозионных и аккумулятивных процессов.

По результатам кластерного анализа и расчетов геоморфометрических параметров рельефа были выделены на исследуемой территории Архангельской области следующие классы:

- 1) зоны с максимальным развитием эрозионных процессов;
- 2) зоны с протеканием эрозионных 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 эрозионных процессов.

¹ Там же.

Для этого были выделены три кластера: угла наклона; индекса расчлененности; профильной кривизны. Объединив три слоя, был получен слой с зонами максимального развития эрозионных 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 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).

Общий алгоритм исследования показан на рис. 11.



Рис. 11. Общий алгоритм исследования

Зоны аккумуляции и транзита выделялись с помощью значений профильной кривизны, плановой кривизны и классификации Трёха (рис. 12, цветная вкладка, с. 274). Для этого были рассчитаны по три кластера значений плановой (горизонтальной) (рис. 12, А) и профильной (вертикальной) кривизн (рис. 12, Б).

В совокупности эти растровые слои определяют зоны аккумуляции (те области, где «вогнутые» участки пересекаются) (рис. 12, В). Таким образом, выделив зоны с максимальным развитием эрозионных процессов, зоны с протеканием эрозионных процессов, зоны аккумуляции и транзита, мы получили карту геоэкологического районирования территории Архангельской области (рис. 12, Г) по интенсивности протекания эрозионных и аккумулятивных процессов.

Ниже представлена таблица 9, описывающая зоны геоэкологического районирования Архангельской области. Все значения рассчитаны на ЦМР с размером ячейки 500 м.

Таблица 9

Статистические параметры зон развития эрозионных процессов

Зоны с максимальным развитием эрозионных процессов				
Параметр	Min	Max	Mean	StdDev
Плановая кривизна, 1/м	$-0,287 \times 10^{-3}$	$0,215 \times 10^{-3}$	$0,005 \times 10^{-3}$	$0,029 \times 10^{-3}$
Профильная кривизна, 1/м	$-0,271 \times 10^{-3}$	$0,210 \times 10^{-3}$	$-0,001 \times 10^{-3}$	$0,036 \times 10^{-3}$
Индекс расчлененности рельефа	6,280	27,734	8,426	2,139
Угол наклона, °	0,021	4,519	1,318	0,357
Зоны с протеканием эрозионных процессов				
Плановая кривизна, 1/м	$-0,142 \times 10^{-3}$	$0,121 \times 10^{-3}$	$0,001 \times 10^{-3}$	$0,021 \times 10^{-3}$
Профильная кривизна, 1/м	$-0,143 \times 10^{-3}$	$0,125 \times 10^{-3}$	$-0,001 \times 10^{-3}$	$0,023 \times 10^{-3}$
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	$-0,287 \times 10^{-3}$	$-0,012 \times 10^{-3}$	$-0,028 \times 10^{-3}$	$0,016 \times 10^{-3}$
Профильная кривизна, 1/м	$-0,271 \times 10^{-3}$	$-0,017 \times 10^{-3}$	$-0,036 \times 10^{-3}$	$0,019 \times 10^{-3}$
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.

Сравнение показало, что зоны с максимальным развитием эрозионных процессов наблюдаются на границах абразионных склонов. Эти зоны расположены на плоских и волнистых моренных равнинах, местами абродированных¹ ледниковыми и морскими водами, вдоль речных долин с комплексом скульптурных и аккумулятивных террас. Для них также характерны: холмистый и холмисто-грядовый моренный рельеф, холмисто-моренный и камовый рельеф и холмисто-котловинный камовый рельеф.

К характеристикам зон с протеканием эрозионных процессов наряду с характеристиками, описанными выше, можно добавить, что в отличие от зон с максимальным протеканием эрозионных процессов, значительно большая их часть расположена на плоских и волнистых моренных равнинах, местами абродированных ледниковыми и морскими водами, а также на озерных и озерно-ледниковых равнинах.

Зоны транзита в основном сконцентрированы на озерных и озерно-ледниковых равнинах.

Зоны аккумуляции наблюдаются во всех описанных выше типах рельефа. Наиболее глубокие впадины пространственно совпадают с поймами крупных рек и обусловлены, скорее всего, наличием стариц, а не артефактами (во всяком случае, далеко не все), что наиболее отчетливо видно при ис-

¹ Подверженные механическому разрушению под действие волн.

пользовании ячейки 1920×1920 м. Основное количество зон аккумуляции представлено бессточными понижениями (впадины) рельефа. В большинстве цифровых моделей рельефа содержится множество понижений рельефа, выраженных в виде площадей без стока и часто называемых впадинами¹. Обычно процедура заполнения впадин проводится для создания «гидрологически корректной» модели без дальнейшего анализа, т.е. выделяемые впадины обычно 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 твердых и жидких осадков, но и косвенно для загрязняющих веществ.

Общее количество ячеек в используемой нами ЦМР – 344 650 349, из них заполнено – 130 705 668 (38% территории). Как указывалось выше, значения глубин впадин колеблется от 1 до 21 м, доминирующей является глубина 1 м (45%), глубины 1–5 м занимают 81% от всей выборки. Таким образом, емкость впадин для заполнения твердыми осадками и загрязняющими веществами, относительно, невелика, в основном 1–5 м.

Выводы

1. На основе составленной корректной цифровой модели рельефа² и разработанного алгоритма расчета геоморфометрических параметров рельефа получен комплект монофакторных геоэкологических карт, позволяющих выделить зоны сноса и накопления осадочного материала, дать количественные характеристики процессам эрозии и аккумуляции и оценить потенциальную устойчивость и/или склонность к эрозии различных участков исследованной территории.

2. Создана карта геоэкологического районирования территории архангельской области на основе кластерного анализа значений углов наклона, потенциала плоскостной эрозии (Is-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.

3. Данные, полученные в результате геоморфометрического анализа, позволяют дать характеристики региона с несколько иных позиций, чем при геоморфологическом районировании³. 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;

4. 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.

Результаты проведенных нами 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Antifaev J.]. Мониторинг чрезвычайных ситуаций с применением радарной космической съемки // Геоматика. 2013. № 3. С. 36–40.
2. Атлас Архангельской области. М.: ГУНиО МО. 1976. 72 с.
3. Берлянд А.М. Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 240 с.
4. Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. Автореф. дисс. ... д. геогр. наук. М., 1999. 32 с.
5. Гофаров М.Ю., Болотов И.Н., Кутинов Ю.Г. Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 167 с.

¹ 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* 17.2 (2013): 495–505.

² Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Указ. соч.

³ Атлас Архангельской области.

6. Евсеева Н.С. Современные процессы рельефообразования юго-востока Западно-Сибирской равнины. Автореф. дисс. ... д. геогр. наук. Томск, 2006. 43 с.
7. Исаченко А.Г. Физико-географическая характеристика региона // Состояние окружающей среды Северо-Западного и Северного регионов России. СПб.: Наука, 1995. С. 7–30.
8. Кластерный анализ [Электронный ресурс] // Интернет-сайт компании StatSoft Russia. Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stcluan.html>.
9. Компания «Совзонд» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sovzond.ru>.
10. 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 т. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 390 + 272 + 472 с.
11. 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.
12. Программное изделие геоинформационная система «Панорама X64» (ГИС Панорама) Форматы и спецификации данных. Векторный формат SXF. Структура данных в двоичном виде ПАРБ.00227-01 99 02. 2017. [Электронный ресурс] // КБ ПАНОРАМА. Режим доступа: <http://gistoolkit.ru/download/doc/sxf4bin.pdf>.
13. Шаврина Е.В., Малков В.Н., Гуркало Е.И. Особенности развития карста в Архангельской области [Электронный ресурс] // Северный Спелео Альманах. 2007. № 7. Режим доступа: http://www.nordspeleo.ru/cca/cca_7/index.htm.
14. Antifaev J. "Empowering Broad-Area Disaster: SAR Complements LiDAR Data To Enable Effective National-scale Coverage for Disaster Planning and Mitigation." *Earth Imaging Journal* (May/June 2013): 32–35. PDF-file <<http://eijournal.com/wp-content/uploads/2013/05/Empowering.pdf>>.
15. "EarthExplorer." *U.S. Geological Survey (USGS)*. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, n.d. Web. 3 Feb. 2016. <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>.
16. 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.
17. Faber V. "Clustering and the Continuous k-Means Algorithm." *Los Alamos Science* 22 (1994): 138–144.
18. Komarasamy G., Wahi A. "A New Algorithm for Selection of Better k Value Using Modified Hill Climbing in k-Means Algorithm." *Journal of Theoretical & Applied Information Technology* 55.3 (2013): 307–314.
19. Likas A., Vlassis N., Verbeek J.J. "The Global k-Means Clustering Algorithm." *Pattern Recognition* 36.2 (2003): 451–461.
20. Lausala T., Valconen L., eds. *Economy Geography and Structure of the Russian Territories of the Barents Region*. Rovaniemi: Arctic Centre University of Lapland, 1999. 250 p.
21. Morissette L., Chartier S. "The k-Means Clustering Technique: General Considerations and Implementation in Mathematica." *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology* 9.1 (2013): 15–24.
22. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. "Fundamental Quantitative Methods of Land Surface Analysis." *Geoderma* 107.1-2 (2002): 1–32.
23. 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* 28.1 (2005): 81–101.
24. Troeh F.R. "Landform Parameters Correlated to Soil Drainage." *Soil Science Society of America Proceedings* 28.6 (1964): 808–812.
25. 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* 17.2 (2013): 495–505.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

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 / А.Л. Минеев, Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова // *Пространство и Время*. — 2017. — № 2-3-4(28-29-30). — С. 267—288. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271provst_st2_3_4-28_29_30.2017.92.