

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 502.5

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕЛЬЕФА ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2021 г. Е. В. Полякова^{1,*}, Ю. Г. Кутинов¹, А. Л. Минеев¹, З. Б. Чистова¹

¹ ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова УрО РАН,
набережная Северной Двины, 23, г. Архангельск, 163000 Россия

*E-mail: lenpo26@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.12.2020 г.

После доработки 20.01.2021 г.

Принята к публикации 20.01.2021 г.

В статье показана взаимосвязь источников загрязнения с природными зонами сноса, транзита и аккумуляции материала, выделенными на основе цифровой модели рельефа в результате геоморфометрического анализа на примере территории Архангельской области. В результате сопоставления данных констатируется пространственное совпадение источников антропогенного воздействия на окружающую среду с природной зоной аккумуляции, выделенной на основе расчета геоморфометрических параметров рельефа (угла наклона, LS фактора и индекса расчлененности). Также показана приуроченность зон лесопромышленного воздействия к природным зонам сноса и, в большей степени, транзита материала, выделенных на основе тех же параметров. Для выделения локальных зон аккумуляции осадков с целью отбора проб для проведения мониторинговых работ по оценке загрязнения почв логичнее применять расчет кривизн поверхности. Геоморфометрический 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.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, геоморфометрические параметры, источники загрязнения

DOI: 10.31857/S0869780921020065

ВВЕДЕНИЕ

При рациональном природопользовании необходимо учитывать природные и экономические условия и свойства территории, на которой производится хозяйственная деятельность. Осуществление хозяйственной деятельности в северных регионах РФ сталкивается с серьезными трудностями из-за отсутствия актуальной и объективной геопрограммной информации об опасных природных явлениях и процессах, а также о вероятности их развития. Экстенсивный характер лесопользования и низкая скорость лесовозобновления приводят к быстрому сокращению лесных площадей [3]. Значительное влияние на северные экосистемы оказывают разведка и разработка месторождений полезных ископаемых [9], урбанизация и развитие дорожной сети. Интенсивное хозяйственное и промышленное освоение северных территорий страны часто приводит к активизации природных процессов или развитию новых опасных явлений, которые ранее здесь отсутствовали [10]. Получение информации

о современном состоянии рельефообразующих процессов, характере их пространственного распределения и интенсивности развития крайне необходимо для обеспечения промышленной и экологической безопасности в процессе хозяйственного освоения региона.

Геоморфометрический анализ является эффективным методом при оценке вклада рельефа в функционирование геосистем. Именно этот метод широко используется в геоморфологии при проведении исследований как в нашей стране, так и за рубежом. Однако в последнее время сфера применения геоморфометрического анализа значительно расширилась, выйдя за рамки чисто геоморфологических работ. Теперь он применяется для решения геоэкологических задач, при проведении изысканий для проектирования и строительства в различных областях и т.д. [1]. Источником входных данных для геоморфометрического анализа выступает цифровая модель рельефа (ЦМР). Расчет геоморфометрических параметров рельефа на основе ЦМР позволяет

Таблица 1. Средние значения геоморфометрических параметров для каждой зоны

Параметр	Зона 1		Зона 2		Зона 3	
	μ^*	δ^{**}	μ	δ	μ	δ
Высота, м	143.92	47.09	123.41	51.70	66.47	44.41
Угол наклона, град.	1.44	0.96	0.96	0.65	0.58	0.43
Индекс расчлененности	1.48	0.94	0.99	0.63	0.61	0.42
LS-фактор	1.08	1.04	0.59	0.59	0.29	0.30

* μ — среднее арифметическое значение, ** δ — среднеквадратическое отклонение

составлять большой набор карт прогнозно-вероятностного моделирования для оценки состояния природной среды в свете возрастающей антропогенной нагрузки.

Цель данной статьи — показать взаимосвязь источников загрязнения с природными зонами сноса, транзита и накопления материала, выделенными в результате геоморфометрического анализа цифровой модели рельефа на примере территории Архангельской области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Геоморфометрический анализ был проведен с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной для территории Архангельской области на основе глобальной ЦМР ASTER GDEM v2 [14] с исходным размером ячейки 1 угловая секунда (около 30×30 м) в программной среде SAGA GIS (URL: <http://www.saga-gis.org>). Обоснованность выбора глобальной ЦМР, методика построения ЦМР области и надежность построенной модели приведены в ряде публикаций авторов [4–8] и в предлагаемой статье рассматриваться не будут.

Для оценки вероятности проявления экзогенных процессов на территории Архангельской области мы проанализировали набор геоморфометрических параметров и выбрали угол наклона (Slope), LS фактор (LS factor) и индекс расчлененности рельефа (Terrain Ruggedness Index (TRI)), поскольку именно эти параметры наиболее характерно отображают процесса эрозии и аккумуляции на региональном уровне. Уклон поверхности является причиной возникновения эрозии, а его величина (угол в точке пересечения между горизонтальной плоскостью и плоскостью касательной к земной поверхности) во многом определяет интенсивность эрозионных процессов. Интенсивность эрозии растет экспоненциально с увеличением уклона. LS фактор — это индекс потенциала плоскостной эрозии (L — длина, S — крутизна склона). Физический смысл данного параметра заключается в том, что чем больше значение коэффициента, тем выше влияние ре-

льефа на процессы водной эрозии [16]. Индекс расчлененности рельефа служит для объективной количественной оценки разнородности (неоднородности) рельефа и выражает величину разницы высот между соседними ячейками ЦМР [18].

Данные параметры подвергались процедуре генерализации (для сглаживания сильно “раздробленных” контуров) и кластеризации методом k -means [17] с разбиением каждого параметра на три кластера — минимальных, средних и максимальных значений. Затем находились пересечения контуров по каждому из кластеров по алгоритму [19] и объединение их в общие полигоны минимальных, средних и максимальных значений (рис. 1). Все операции проводились в программной среде SAGA GIS. В результате получена карта районирования области с выделением зон сноса (территорий, предрасположенных к развитию эрозионных процессов), транзита и накопления (территорий, предрасположенных к развитию аккумулятивных процессов) материала (рис. 2). Подробно методика построения карты зонирования описана в [12]. В табл. 1 приведены статистические данные по выбранным параметрам внутри каждой из зон.

Выделенные зоны сопоставлялись с картой источников антропогенного воздействия на природную среду Архангельской области, составленной на основе карты объектов техногенного воздействия, приведенной в работе [2], и проекта “Схема территориального планирования Архангельской области”.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Российским научно-исследовательским и проектным институтом Урбанистики (РосНИПИУрбанистики) по заданию администрации Архангельской области был разработан проект “Схема территориального планирования Архангельской области” (Постановление Правительства Архангельской области от 25 декабря 2012 г. № 608-пп “Об утверждении схемы территориального планирования Архангельской области”). Цель проекта — формирование комплексной градостроительной политики, обеспечивающей рациональ-

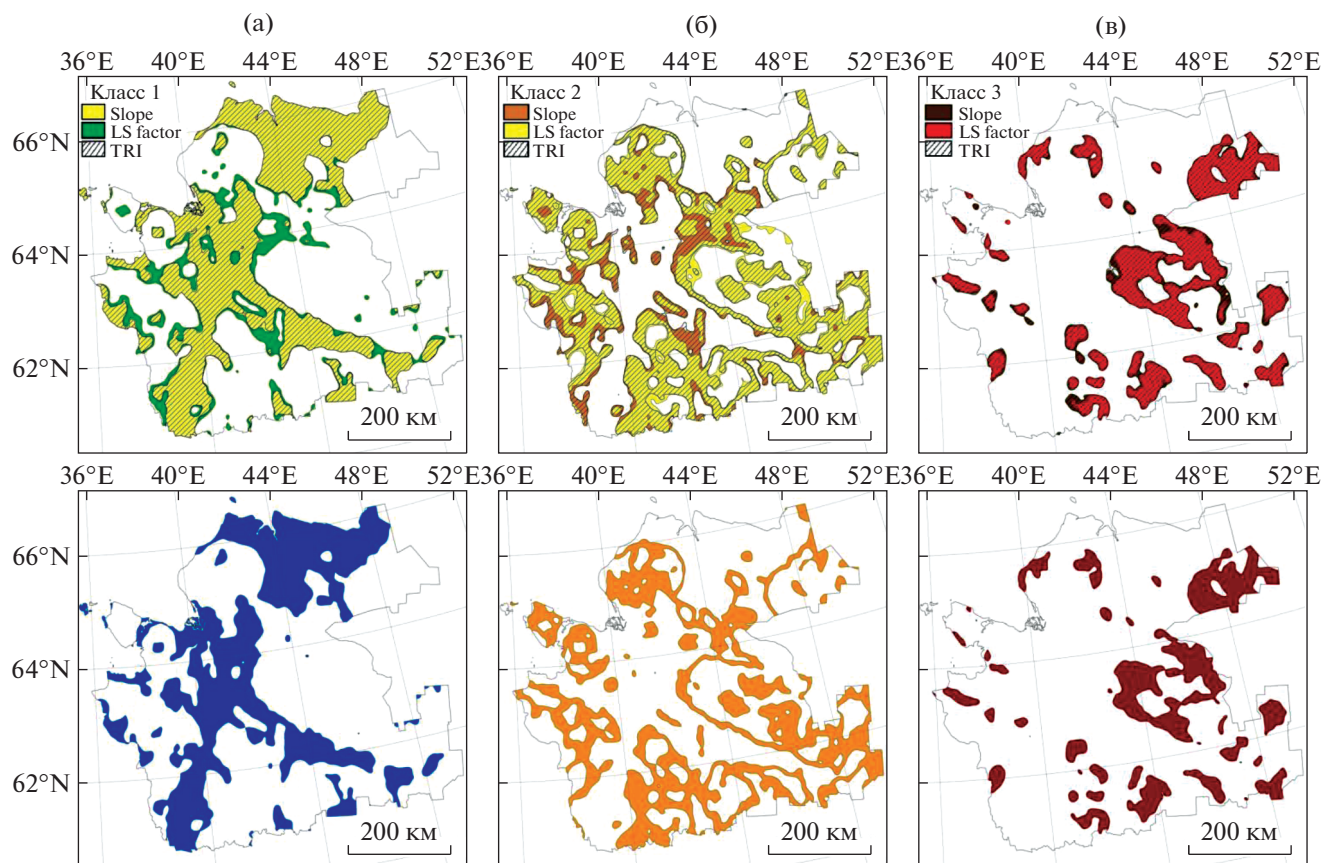


Рис. 1. Пересечения полигонов минимальных (а), средних (б) и максимальных (в) значений угла наклона, LS фактора и индекса расчлененности рельефа и их объединенные полигоны.

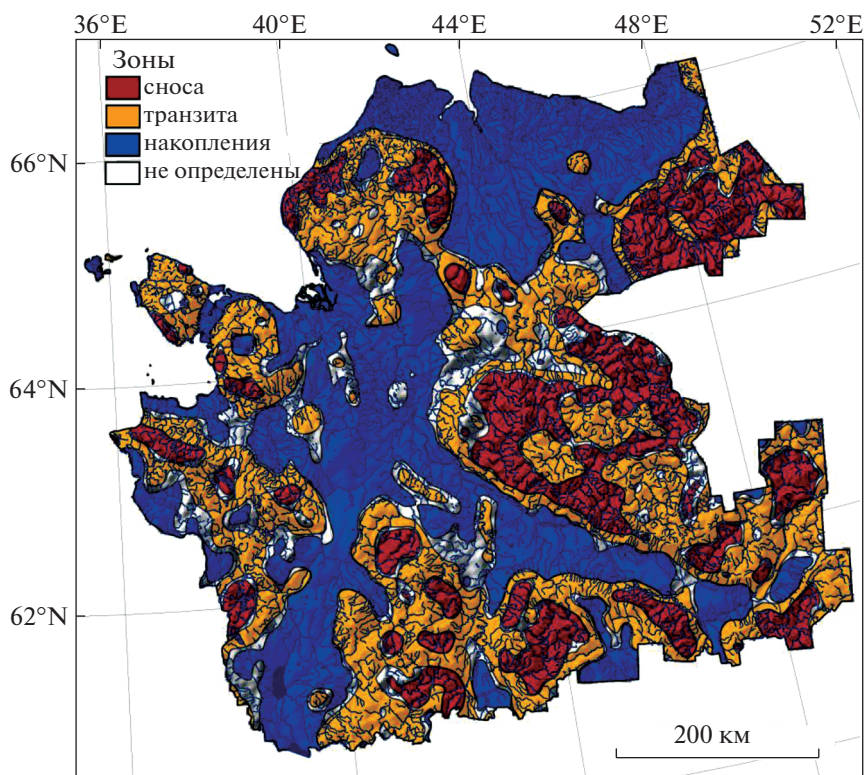


Рис. 2. Районирование территории Архангельской области по зонам сноса, транзита и накопления материала (в качестве “подложки” использовалась теневая отмычка рельефа).

Таблица 2. Площадная характеристика зон с различной вероятностью проявления экзогенных процессов на территории Архангельской области

Зоны	Площадь	
	км ²	%
Зона 1 – наибольшая вероятность развития эрозионных процессов (зона сноса)	106966	18.21
Зона 2 – возможное проявление эрозионных процессов (зона транзита)	194606	33.13
Зона 3 – потенциальное развитие аккумулятивных процессов (зона накопления)	205002	34.90
Неопределенные зоны	80826	13.76
Общая площадь	587400	100

ную планировочную организацию системы расселения и межселенных территорий (URL: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minstroy/shemes/>).

Схема территориального планирования (СТП) является основой для разработки комплекса проектной и правовой документации, регулирующей и регламентирующей градостроительную деятельность, а также обеспечивающей устойчивое функционирование территории области. Она включает в себя проектный план, схемы инженерной, планировочной, транспортной инфраструктуры, функционального зонирования и зон с особыми условиями (URL: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minstroy/shemes/>).

Специализацией Архангельского региона на российском рынке являются деревообработка и целлюлозно-бумажное производство, машиностроение (военное, судостроение, металлообработка, строительство морских буровых станций и пр.), рыбная промышленность и транспорт. Существенное значение в экономике области имеют топливно-энергетический комплекс, добывающая промышленность и агропромышленный комплекс. Ведущей отраслью промышленности на ближайшую перспективу остается лесопромышленный комплекс. Основными направлениями развития отрасли выступают освоение новых лесосырьевых территорий и развитие глубокой переработки древесины.

Таким образом, в настоящее время отмечается возрастание антропогенной нагрузки, что не может не сказаться на состоянии природной среды Архангельской области.

Загрязнение территории Архангельской области определяется на глобальном и региональном уровнях. Основные источники воздействия на глобальном уровне – Европейский центр деградации окружающей среды и Кольский про-

мышленный узел. На региональном уровне – Архангельская и Котласская промышленные агломерации, 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 ряд других.

Атмосферный тип переноса загрязнения с жидкими и твердыми (снеговыми) осадками является основным для исследуемой территории. В дальнейшем происходит перераспределение загрязняющих веществ в зависимости от морфоструктурных форм рельефа и характера эрозионных процессов.

Ранее нами выявлено, что участки с наибольшей вероятностью развития эрозионных процессов, выделенные на основе объединения кластеров максимальных значений угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа и соответствующие зонам сноса материала, составляют порядка 18% исследуемой территории. Участки с возможным проявлением эрозионных процессов, выделенные на основе объединения кластеров средних значений тех же параметров и соответствующие зонам транзита материала, составляют порядка 33% территории. Участки с потенциальным развитием аккумулятивных процессов, выделенные на основе объединения кластеров минимальных значений данных параметров и соответствующие зонам накопления материала, составляют 35% территории Архангельской области [12]. Площадные характеристики выделенных зон приведены в табл. 2.

Природная зона аккумуляции раскрывает потенциальную склонность рельефа к накоплению материала, в том числе и загрязняющих веществ. На основании карты объектов техногенного воздействия, приведенной в работе [2], а также СТП, проведено сопоставление источников антропогенного воздействия на природную среду Архангельской области с картой зон сноса, транзита и накопления материала (рис. 3).

В результате сопоставления (наложения) данных можно констатировать визуальное пространственное совпадение источников антропогенного воздействия на окружающую среду с природной зоной аккумуляции, выделенной по ЦМР Архангельской области на основе расчета геоморфометрических параметров (угла наклона, LS фактора, индекса расчлененности рельефа). Подобная положительная тенденция крайне негативно сказывается на экологическом состоянии территории.

Кроме того, приуроченность зон лесопромышленного воздействия (лесозаготовка и транспортировка древесины) к природным зонам сноса и, в большей степени, транзита материала

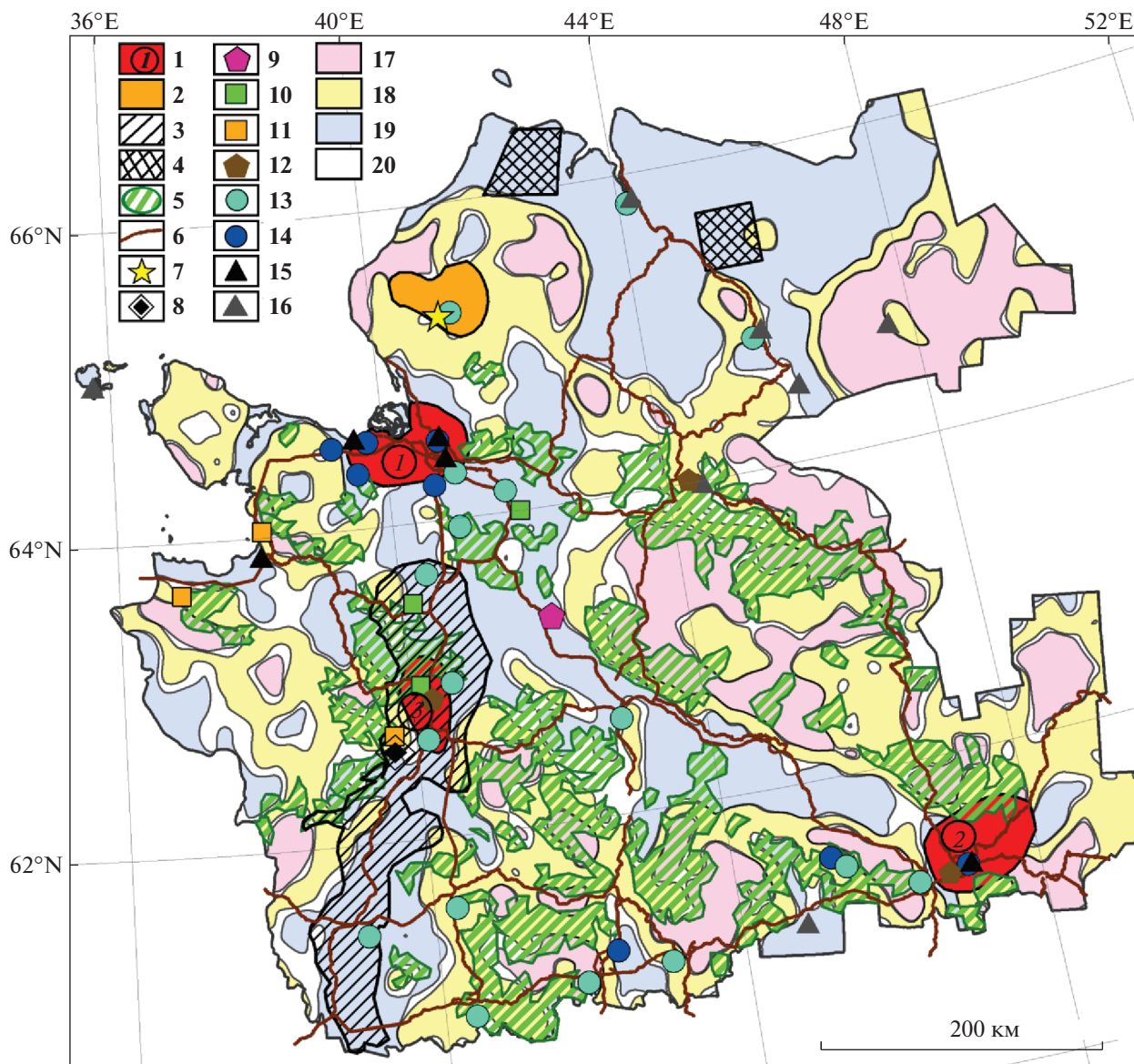


Рис. 3. Взаимосвязь источников антропогенного воздействия на природную среду Архангельской области с зонами сноса, транзита и накопления материала: 1 – зоны интенсивного промышленного воздействия: 1 – Архангельская, и 2 – Котласская промышленные агломерации; 3 – Плесецкий промышленный район; 2 – горнодобывающие зоны; 3 – зона воздействия космодрома; 4 – зоны сброса отработанных ступеней ракет; 5 – зоны лесопромышленного воздействия; 6 – дороги общего и федерального пользования; 7–14 – месторождения: 7 – алмазов; 8 – бокситов; 9 – гипсов; 10 – известняков; 11 – строительных камней; 12 – глин; 13 – пресных подземных вод; 14 – минеральных подземных вод; 15 – ТЭЦ; 16 – крупные дизельные электростанции; 17–20 – природные зоны: 17 – сноса; 18 – транзита; 19 – накопления материала; 20 – неопределенные.

(рис. 4) также вызывает большие опасения за состояние окружающей среды.

Общая площадь земель лесного фонда Архангельской области составляет 29 млн га, из которых 74% — это эксплуатационные леса [13]. Основной вид воздействия при лесохозяйственной деятельности — нарушение целостности почвенно-растительного покрова. А это, в свою очередь, влечет за собой активизацию склоновых процессов, развитие оползней, оврагов и пр. На рис. 5

приведены примеры неповрежденного и нарушенного склона. Промышленные рубки, даже при самых современных производственных методах и подходах, необратимо меняют экологический баланс и облик территории.

Следует отметить важность пространственно-го разрешения ЦМР для моделирования возможности развития экзогенных процессов на разных уровнях организации [15]. Для моделирования эрозии и аккумуляции в локальных масштабах

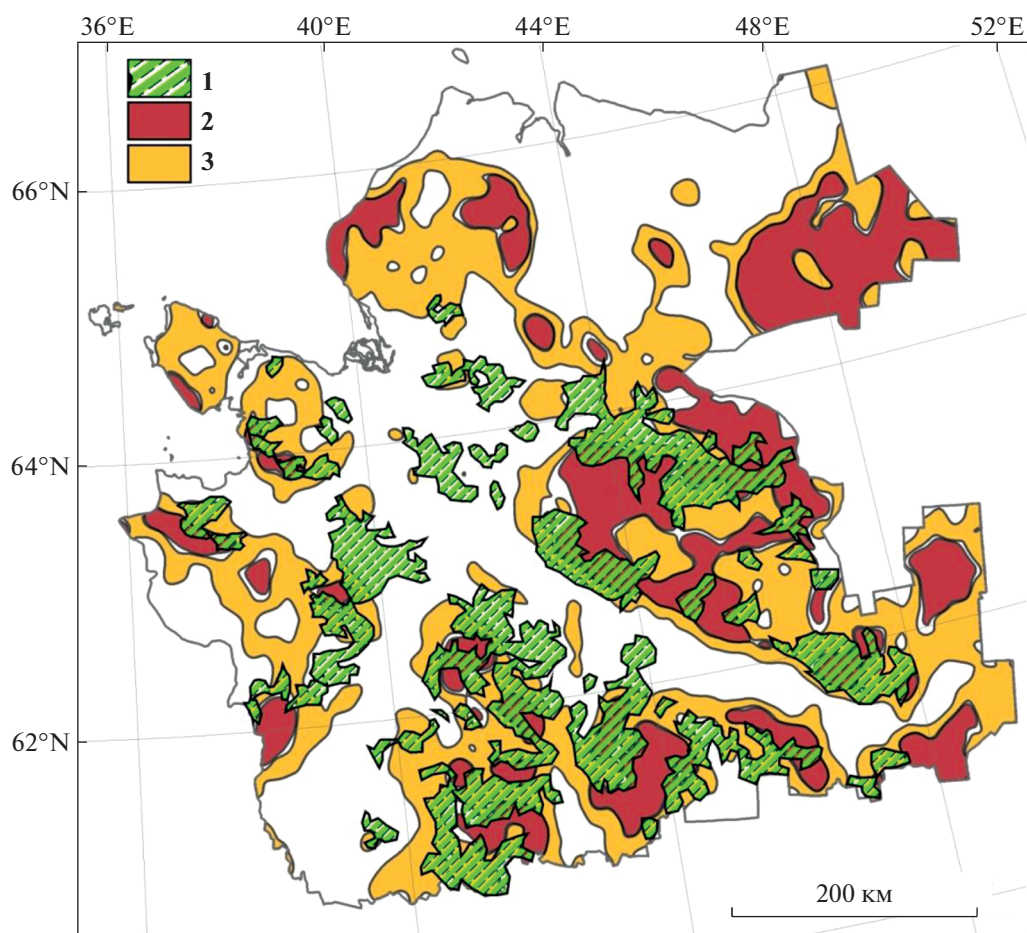


Рис. 4. Сопоставление зон лесопромышленного воздействия с природными зонами сноса и транзита материала: 1 – зоны лесопромышленного воздействия; 2–3 – природные зоны: 2 – сноса, 3 – транзита материала.



Рис. 5. Пример неповрежденного естественного (а) и нарушенного (б) склона (фото Поляковой Е.В.).

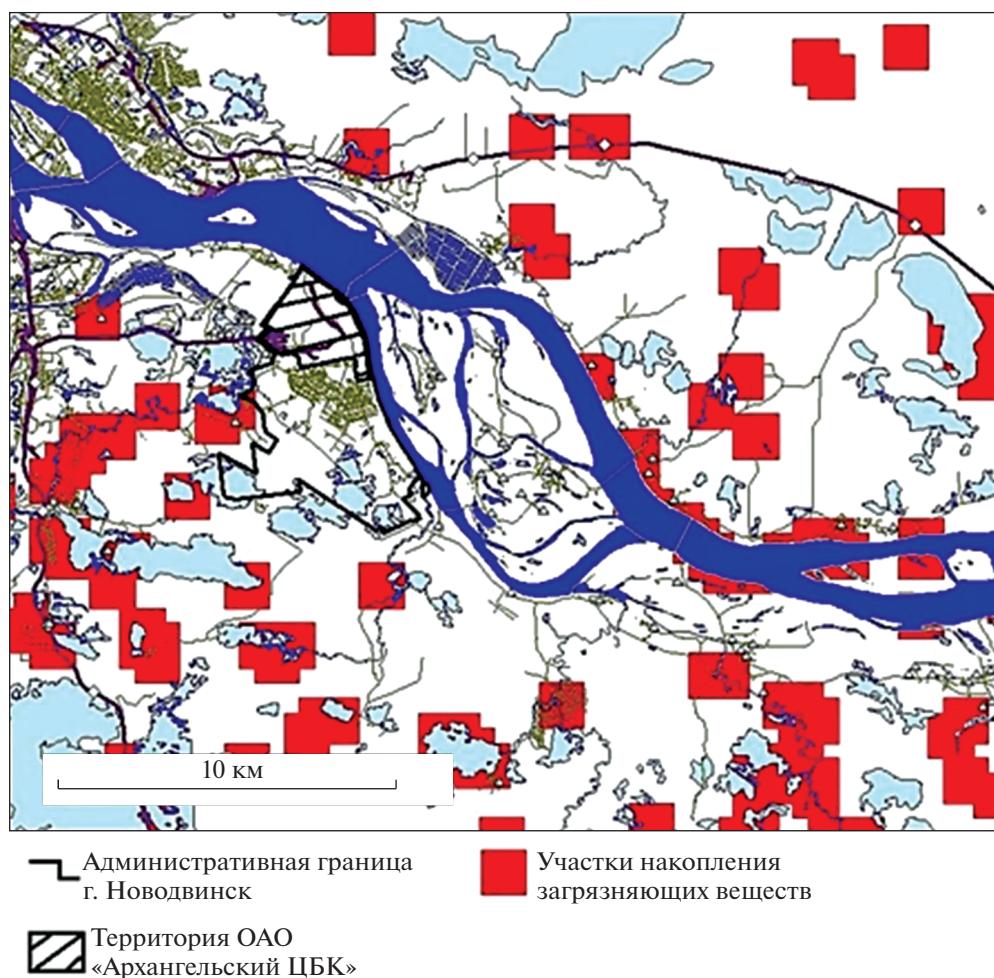


Рис. 6. Зоны аккумуляции загрязняющих веществ в окружении г. Новодвинск.

целесообразно использовать ЦМР с высоким пространственным разрешением (не более 1 угловой секунды). Для региональных и глобальных масштабов – ЦМР с низким пространственным разрешением, либо искусственно уменьшенным размером ячейки (2–3 и более угловых секунд).

От поставленных задач и масштабов территории зависит и выбор геоморфометрических параметров. На локальном уровне зоны сноса, транзита и аккумуляции хорошо описываются разными видами кривизн. Грамотное их сочетание позволяет с точностью до исходного разрешения ЦМР обозначать места возможного сноса, переноса и накопления различного материала, в том числе и загрязняющих веществ.

Так, например, для проведения мониторинговых работ по оценке состояния и загрязнения объектов окружающей среды, находящихся на территории ОАО «Архангельский ЦБК» и в пределах его воздействия на основе расчета горизонтальной и вертикальной кривизн были выделены зоны аккумуляции загрязняющих веществ (рис. 6).

Оба типа кривизн используются для различения выпуклых и вогнутых форм рельефа. При этом горизонтальная кривизна характеризует направление потока, а вертикальная – его скорость. Горизонтальная вогнутость (отрицательная форма) указывает на схождение (конвергенцию), а горизонтальная выпуклость (положительная форма) – на расхождение (дивергенцию) линий потока, тем самым определяя пространственную неоднородность стока. Вертикальная выпуклость указывает на ускорение потока, вертикальная вогнутость – на его замедление. То есть расчет вертикальной кривизны позволяет определять местоположение зон сноса материала на положительных формах и его накопления на отрицательных, определяя тем самым закономерности эрозии и аккумуляции осадков и загрязняющих веществ [16].

Таким образом были выделены участки, предположительно к накоплению осадков. Именно в этих зонах необходимо проводить отбор проб для проведения мониторинговых работ по оценке загрязнения почв.

ВЫВОДЫ

Геоморфометрический анализ ЦМР является неотъемлемой частью современных геоэкологических и экологических исследований, мониторинговых работ в силу доступности исходного материала и его высокой разрешающей способности, объективности количественных методов расчета, а также единовременного охвата больших территорий [11]. Карты геоморфометрических параметров дают возможность оценить пространственное положение и количественные характеристики процессов эрозии и аккумуляции на различных участках исследуемой территории. Расчет геоморфометрических параметров рельефа может выступать объективным инструментом при оценке риска развития опасных экзогенных процессов при планировании антропогенно-хозяйственной деятельности.

Для территории Архангельской области отмечается прямая корреляция источников антропогенного воздействия на окружающую среду с природными зонами аккумуляции, выделенными по ЦМР, что крайне негативно сказывается на экологическом состоянии территории.

Геоморфометрический подход, в отличие от применяемого Росгидрометом (по примерно равномерной сети), позволяет оценить участки накопления загрязняющих веществ на разных уровнях детализации — от регионального (административные области, округа, края) до локального (территории промышленных агломераций, предприятий и т.п.). Именно на этих участках необходимо проведение регулярного наземного мониторинга, в отличие от равномерного размещения точек наблюдений по всей площади.

Исследование проведено в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН № гос. регистрации АААА-А18-118012390305-7, а также при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60024 “Анализ состояния природной среды равнинных территорий Арктической зоны РФ с использованием геоинформационных технологий и цифрового моделирования рельефа”) и Правительства Архангельской области (проект № 18-411-292001 р_мк “Исследование гуманитарно-географических образов этнокультурных ландшафтов Русского Севера как символического ресурса формирования имиджа северных и арктических территорий региона”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глейзер И.В., Копанева И.М., Рублева Е.А. Некоторые аспекты использования ГИС-технологий при морфометрическом анализе рельефа // Вестник Удмуртского университета, 2006. № 11. С. 143–146.
2. Губайдуллин М.Г. Геоэкологические условия освоения минерально-сырьевых ресурсов Европейского

Севера России. Архангельск: Поморский госуниверситет. 2002. 310 с.

3. Исаченко А.Г. Физико-географическая характеристика региона // Состояние окружающей среды Северо-Западного и Северного регионов России. СПб: Наука, 1995. С. 7–30.
4. Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Полякова Е.В., Чистова З.Б. Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и ее подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: “Социосфера”, 2019. 176 с.
5. 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.
6. 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. № 2–4 (28–30). С. 267–288.
7. 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
8. 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>
9. Миняев А.П., Юдахин Ф.Н. Экологические проблемы Архангельской области // Экологические проблемы Европейского Севера: Сб. науч. трудов. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. С. 3–9
10. Опасные экзогенные процессы / Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
11. Полякова Е.В. Геоморфометрический подход в геоэкологических исследованиях северных территорий страны // Успехи современного естествознания. 2018. № 3. С. 117–122. <https://doi.org/10.17513/use.36712>
12. 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>
13. Тоскунина В.Э. Проблемы лесного комплекса Архангельской области и пути их решения // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2008. Вып. 3 (3). С. 29–31.
14. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 — Summary of Validation Results / ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAAC, USGS/EROS, 2011.

- http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf
15. Doumit J.A., Awad S.F. DEM Spatial Resolution Impact On Hillslope Erosion and Deposition Modeling, an Application On Lebanese Watersheds // Sustainability in Environment, 2019. V. 4 (2). P. 75–85. <https://doi.org/10.22158/se.v4n2p75>
 16. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications / Hengl T., Reuter H.I. (Eds.). Amsterdam: Elsevier, 2009. 796 p.
 17. Morissette L., Chartier S. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica // Tutorials in Quantitative Methods for Psychology, 2013. V. 9 (1). P. 15–24. <https://doi.org/10.20982/tqmp.09.1.p015>
 18. Reily Sh.J., DeGloria St.D., Elliot R. A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity // Intermountain Journal of Science, 1999. V. 5 (1–4). P. 23–27.
 19. Vatti B.R. A generic solution to polygon clipping // Communications of the ACM, 1992. V. 35 (7). P. 56–63. <https://doi.org/10.1145/129902.129906>

THE USE OF GEOMORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE RELIEF UPON ECONOMIC ACTIVITY IN THE ARKHANGELSK REGION

E. V. Polyakova^{a, #}, Yu. G. Kutinov^a, A. L. Mineev^a, and Z. B. Chistova^a

^a Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, nab. Severnoi Dviny, 23, Arkhangel'sk, 163000 Russia

[#] E-mail: lenpo26@yandex.ru

This article shows the relationship of pollution sources with the natural zones of material drift, transit and accumulation identified on the basis of a digital elevation model as a result of geomorphometric analysis using the territory of the Arkhangelsk region as an example. As a result of data comparison, a spatial coincidence of the sources of anthropogenic environmental impact with the natural accumulation zone identified on the basis of the calculation of geomorphometric relief parameters (Slope, LS factor, Terrain Ruggedness Index) was found. The confinement of the zones of forestry impact to the natural zones of demolition and, to a greater extent, the transit of material distinguished according to the same parameters is also shown. To identify local areas of sediment accumulation for the purpose of sampling for soil pollution assessment monitoring, it is more appropriate to use the calculation of surface curvatures. The geomorphometric approach, unlike the one used by the Russian Hydrometeorological Service (according to an approximately uniform network), allows one to estimate the areas of pollutant accumulation at different levels of detail – from regional to local. It is in these areas that regular ground monitoring is necessary, and not the distribution of observation points evenly over the entire area.

Keywords: digital elevation model, geomorphometric parameters, pollution source, Arkhangelsk region

REFERENCES

1. Gleizer, I.V., Kopaneva, I.M., Rubleva, E.A. *Nekotoryye aspekty ispol'zovaniya GIS-tekhnologii pri morfometricheskoy analize rel'efa* [Some aspects in using GIS-technologies upon morfometric analysis of the relief]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, 2006, no. 11, pp. 143–146. (in Russian)
2. Gubaidullin, M.G. *Geoekologicheskie usloviya osvoeniya mineral'no-syr'evykh resursov Evropeiskogo Severa Rossii* [Geoenvironmental conditions of mineral resources development in the European North of Russia]. Arkhangel'sk, Pomorskii universitet Publ., 2002, 310 p. (in Russian)
3. Isachenko, A.G. *Fiziko-geograficheskaya kharakteristika regiona* [Physico-geographical characteristics of the region]. *Sostoyaniye okruzhayushchei sredy Severo-Zapadnogo i Severnogo regionov Rossii* [The environment state in the North-Western and Northern regions of Russia]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1995, pp. 7–30. (in Russian)
4. Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Polyakova, E.V., Chistova, Z.B. *Vybor bazovoi tsifrovoy modeli rel'efa (TsMR) ravninnykh territorii Severa Evrazii i ee podgotovka dlya geologicheskogo raionirovaniya (na primere Arkhangel'skoi oblasti)* [Selection of basic digital elevation model (DEM) for Eurasian North plains and its validation for geological zoning (by the example of Arkhangel'skaya oblast)]. Penza, Sotsiosfera Publ., 2019, 176 p. (in Russian)
5. Mineev, A.L., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Polyakova, E.V. *Podgotovka tsifrovoy modeli rel'efa dlya issledovaniya ekzogennykh protsessov severnykh territorii Rossiiskoi Federatsii* [Validation of digital elevation model for the study of exogenous processes in the northern areas of the Russian Federation]. *Prostranstvo i vremya*, 2015, no. 3 (21), pp. 278–291. (in Russian)
6. Mineev, A.L., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Polyakova, E.V. *Geoekologicheskoe raionirovanie territorii Arkhangel'skoi oblasti s ispol'zovaniem tsifrovyykh modelei rel'efa i GIS-tekhnologii* [Geoenvironmental zoning of the Arkhangelsk oblast territory using DEMs and GIS-technologies]. *Prostranstvo i vremya*, 2017, no. 2–4 (28–30), pp. 267–288. (in Russian)
7. Mineev, A.L., Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B. *Metodicheskie aspekty sozdaniya tsifrovoy modeli rel'efa Arkhangel'skoi oblasti na osnove STER GDEM V.2* [Methodical aspects of DEM development

- for Arkhangel'skaya oblast based on STER GDEM V.2]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 2. URL: www.science-education.ru/129-21949 (in Russian)
8. Mineev, A.L., Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B. *Nadezhnost' tsifrovoy modeli rel'efa Arkhangel'skoi oblasti dlya provedeniya geoekologicheskikh issledovaniy* [Reliability of digital elevation model for Arkhangel'sk oblast for geoecological studies]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 58–67. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67> (in Russian)
 9. Minyaev, A.P., Yudakhin, F.N. *Ekologicheskie problemy Arkhangel'skoi oblasti* [Ecological problems in Arkhangel'sk oblast]. *Ekologicheskie problemy Evropeiskogo Severa* [Ecological problems of the European North]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 1996, pp. 3–9. (in Russian)
 10. *Opasnye ekzogennye protsessy* [Hazardous exogenous processes]. Osipov, V.I., Ed., Moscow, GEOS, 1999, 290 p. (in Russian)
 11. Polyakova, E.V. *Geomorfometricheskii podkhod v geoekologicheskikh issledovaniyakh severnykh territorii strany* [Geomorfometric approach in geoecological studies of the northern regions of the country]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, no. 3, pp. 117–122. <https://doi.org/10.17513/use.36712> (in Russian)
 12. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Chistova, Z.B. *Tsifrovoye modelirovaniye rel'efa v otsenke veroyatnosti razvitiya erozionnykh protsessov v severnykh regionakh strany* [Digital elevation modeling in assessing the probability of development of exogenous processes in the northern regions of the country]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 95–104. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104> (in Russian)
 13. Toskunina, V.E. *Problemy lesnogo kompleksa Arkhangel'skoi oblasti i puti ikh resheniya* [Problems of forest complex in the Arkhangel'sk oblast and ways to solve them]. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz*, 2008, issue 3(3), pp. 29–31. (in Russian)
 14. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results / ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS, 2011. http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf
 15. Doumit, J.A., Awad, S.F. DEM Spatial resolution impact on hillslope erosion and deposition modeling, an application on Lebanese watersheds. *Sustainability in Environment*, 2019, vol. 4 (2), pp. 75–85. <http://dx.doi.org/10.22158/se.v4n2p75>
 16. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.). Amsterdam, Elsevier, 2009. 796 p.
 17. Morissette, L., Chartier, S. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 2013, vol. 9 (1), pp. 15–24. <http://dx.doi.org/10.20982/tqmp.09.1.p015>
 18. Reilly, Sh.J., DeGloria, St.D., Elliot, R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Science*, 1999, vol. 5 (1–4), pp. 23–27.
 19. Vatti, B.R. A generic solution to polygon clipping. *Communications of the ACM*, 1992, vol. 35 (7), pp. 56–63. <http://dx.doi.org/10.1145/129902.129906>