

Цифровое моделирование рельефа в оценке вероятности развития эрозионных процессов в северных регионах страны

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

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. Н. П. Лаверова РАН, Архангельск, 163000, Россия
E-mail: lenpro26@yandex.ru*

Считается, что на равнинных лесопокрытых территориях экзогенные процессы протекают медленно и находят слабое отражение в формах рельефа. Однако ситуация коренным образом изменяется при нарушении целостности растительного покрова, что неизбежно при современных методах хозяйственного освоения северных территорий. В статье авторами проведена оценка вероятности развития эрозионных процессов на основе таких геоморфометрических параметров рельефа, как угол наклона (Slope), LS-фактор (LS factor), индекс расчленённости рельефа (TRI) и топографический индекс влажности (TWI), рассчитанных на основе цифровой модели рельефа Архангельской области. После проведения процедуры генерализации и кластерного анализа область исследования делилась на три класса: минимальных, средних и максимальных значений выбранных параметров. На основе объединения контуров кластерных значений параметров на территории исследований выделены три зоны: с наибольшей вероятностью развития эрозионных процессов, соответствующие зонам сноса материала; с возможным проявлением эрозионных процессов, соответствующие зонам транзита материала; с потенциальным развитием аккумулятивных процессов, соответствующие зонам накопления материала, в том числе и загрязняющих веществ. В зоне аккумуляции выделены территории, склонные к подтоплению во время паводков и предрасположенные к заболачиванию. Выявленные на основе геоморфометрического анализа особенности территории следует учитывать при планировании и осуществлении хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, геоморфометрические параметры, геоморфометрический анализ, эрозионные процессы

Одобрена к печати: 06.12.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104

Введение

Рельеф является одним из основных факторов, определяющих ход и направленность процессов, протекающих в приповерхностном слое планеты (Huggett, Cheesman, 2002). Считается, что на равнинных лесопокрытых территориях эрозионные процессы протекают достаточно медленно и находят слабое отражение в формах рельефа. Так, на Карте районирования территории России по степени экстремальности развития эколого-геоморфологических ситуаций, составленной Институтом географии РАН в масштабе 1:9 000 000 (Карта..., 2006), интенсивность эрозионных процессов северотаёжной зоны в основном оценивается как «очень слабая» и «слабая», а экзодинамические условия (сейсмические и экзогенные) как «в целом благоприятные». Однако ситуация коренным образом изменяется при нарушении целостности растительного покрова. Интенсивное хозяйственное освоение северных территорий часто приводит к активизации природных процессов или развитию новых опасных явлений, которые ранее здесь отсутствовали (Опасные экзогенные..., 1999). Кроме того, глобальные изменения среднегодовых температур, особенно ярко проявляющиеся в северных регионах, зачастую могут являться первопричиной развития различных генетически связанных экзогенных процессов.

Наложение этих двух процессов — антропогенного и природного — требует тщательного изучения учёта их последствий, особенно синергетических эффектов (Кутинов и др., 2012). В этой связи необходимы количественные расчёты геоморфометрических параметров цифровой модели рельефа, которые будут служить основой для оценки вероятности развития

эрозионных процессов в свете возрастающей антропогенной нагрузки и изменения климата в северных регионах страны.

Целью работ являлось проведение геоэкологического районирования территории Архангельской области по вероятности развития опасных экзогенных процессов на основе цифровой модели рельефа. Частично результаты исследований представлялись авторами ранее в публикациях (Кутинов и др., 2017, 2018; Минеев и др., 2017; Полякова и др., 2016; Polyakova et al., 2016). Одной из задач в рамках данного исследования стало выделение зон сноса, транзита и накопления материала, в том числе и загрязняющих веществ, а также территорий, склонных к подтоплению во время паводков и предрасположенных к заболачиванию, на основе геоморфометрического анализа рельефа.

Материалы и методика работ

Исследование проведено в пределах Архангельской области. Ранее авторами была построена цифровая модель рельефа (ЦМР) региона на основе ASTER GDEM v.2 в программной среде SAGA GIS. Подробно методика построения модели изложена в работах (Минеев и др., 2015а, б). Надёжность модели оценена и приведена в статье (Минеев и др., 2018).

Для оценки вероятности проявления эрозионных процессов были выбраны такие геоморфометрические параметры, как угол наклона (Slope), LS-фактор (LS factor), индекс расчленённости рельефа (Terrain Ruggedness Index (TRI)) и топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index (TWI)).

При анализе рельефа необходима точная регистрация либо размеров контуров, либо их площадей (Кочкуркин, Кутинов, 2000). В силу того, что ЦМР Архангельской области имеет довольно большую плотность ячеек, значения рассчитываемых на её основе геоморфометрических параметров имеют прерывистые, сильно «раздробленные» контуры, не позволяющие судить о характере протекания того или иного процесса. Один из способов объединения контуров — это генерализация данных. Генерализация неизбежно ведёт к потерям локальных данных. Некоторые геоморфометрические параметры сильно зависят от выбираемого при генерализации шага решётки матрицы высот, другие — менее сильно. Общая тенденция такова, что при увеличении шага решётки значения параметров снижаются. Не существует объективного масштаба, для которого значения параметров были бы «правильными». В работе (Evans, 1975) это названо «основной проблемой геоморфометрии». За «негладкость» земной поверхности приходится платить зависимостью многих параметров от масштаба (Shary et al., 2005).

В рамках исследования процедура генерализации состояла из следующих шагов:

1. Выбор окна (шага решётки) генерализации. В данном случае размер окна составил 10×10 км и определялся площадью исследуемой территории. Чем больше площадь, тем большее окно можно выбрать, сохраняя тождественность пространственного распределения значений параметров.
2. Приведение усреднённых данных к исходному размеру ячейки билинейным сплайном. После такой процедуры контуры значений параметров имеют гладкие, визуально определяемые границы.

Далее генерализованные значения подвергались кластерному анализу. В SAGA GIS при кластеризации применяется алгоритм k-средних (Forgy, 1965; Morissette, Chartier, 2013).

В результате кластерного анализа получены контуры, разделяющие область исследования на три части: минимальные (класс 1), средние (класс 2) и максимальные (класс 3) значения угла наклона, LS-фактора и индекса расчленённости рельефа (рис. 1, см. с. 97).

Затем находились общие границы контуров, соответствующих минимальным, средним и максимальным кластерам значений параметров. Для этого вначале выполнялась векторизация растровых областей в полигоны в SAGA GIS модулем Vectorising Grid Classes, вычислялись пересечения полигонов модулем Intersect по алгоритму (Vatti, 1992), создавались объединённые полигоны минимальных, средних и максимальных кластерных значений угла наклона, LS-фактора и индекса расчленённости рельефа. На их основе выделены зоны сноса, транзита и накопления материала.

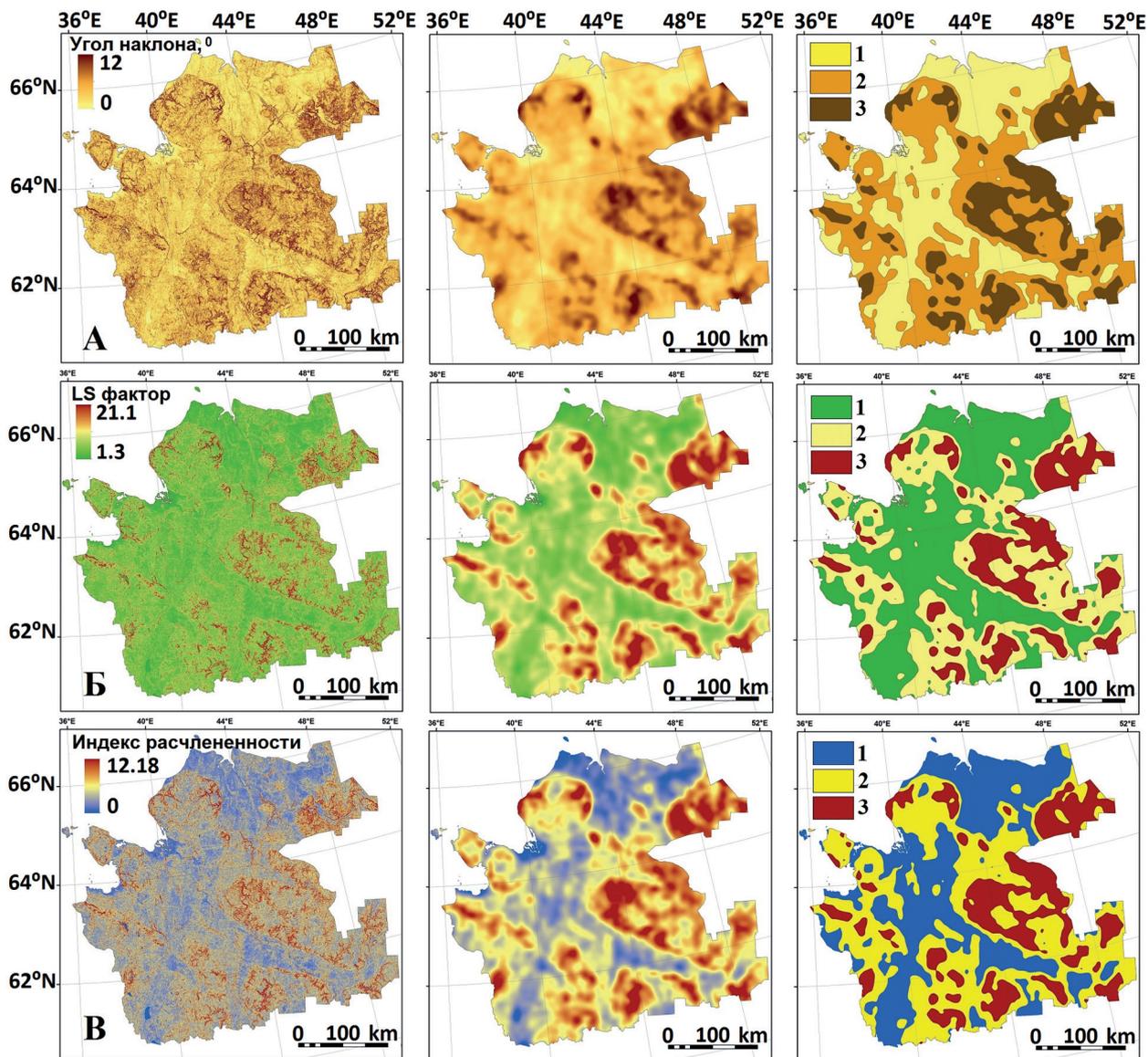


Рис. 1. Значения параметров, рассчитанных на исходной цифровой модели рельефа (слева), после генерализации (в центре), после кластеризации (справа): А — угол наклона, Б — LS-фактор, В — индекс расчленённости; 1 — минимальные, 2 — средние, 3 — максимальные значения параметров

Далее зона минимальных значений перечисленных параметров делилась на две подзоны по степени увлажнения. Для этого сначала были подсчитаны пять кластеров значений индекса влажности. Выбраны два максимальных кластера (класс 4 и 5). Проведены аналогичные процедуры векторизации и пересечения полигонов классов 4 и 5 индекса влажности с полигоном минимальных значений угла наклона, LS-фактора и индекса расчленённости рельефа. В зоне накопления выделены две подзоны, предрасположенные к подтоплению во время паводков и заболачиванию территории.

Результаты работ и обсуждение

Эрозия на Земном шаре является одним из ведущих факторов рельефообразования. В отличие от традиционных работ по экзогенному рельефообразованию, основанных на жёстких критериях генетического разделения процессов при их классифицировании (Проблемы классифицирования..., 1985), существует нетрадиционный подход к изучению экзогенных

процессов. Его суть заключается в том, что всё генетическое многообразие физико-геологических (рельефообразующих) процессов эродировывает сушу, будь то овражная или речная эрозия, солифлюкция, эоловые и др. процессы. Поэтому логичным и уместным представляется анализировать данные процессы через степень их эрозионности. Воздействие солнечной радиации, ветра, воды и льда на горные породы носит в целом «разъедающий» характер. Такая оценка воздействия полностью соответствует термину «эрозия». Это позволяет условно отнести весь комплекс деструктивных и транзитных процессов на суше к эрозионным (Познанин, 2012).

Геоморфометрический анализ цифровой модели рельефа является неотъемлемой частью современных геоэкологических исследований в силу доступности исходного материала, объективности количественных методов расчёта и охвата больших территорий одновременно. Расчёт геоморфометрических параметров рельефа позволяет создавать комплект монофакторных геоэкологических карт, каждая из которых характеризует территорию с точки зрения предпосылок рельефа, иллюстрируя зоны сноса, транзита и накопления осадочного материала, увлажнённости и расчленённости. Карты геоморфометрических параметров дают возможность оценить пространственное положение и количественные характеристики процессов эрозии и аккумуляции на различных участках исследуемой территории. В то же время нецелесообразно делать выводы о возможности проявления опасных процессов, используя значения только одного показателя. Корректнее брать комбинации параметров и, применив ряд логических и математических процедур, проводить вероятностное моделирование проявления экзогенных геологических процессов (Полякова, 2018).

Вероятность развития опасных экзогенных процессов наиболее полно отражают следующие геоморфометрические параметры рельефа: геометрические (угол наклона поверхности, экспозиция склона, кривизны плановая и профильная); гидрологические (общая и удельная водосборные площади, топографический индекс влажности, индекс мощности эрозии, индекс потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор), индекс баланса геомасс); топо-климатические (потенциальная солнечная радиация, фотосинтетически активная радиация); вертикальной дифференциации природной среды (индекс расчленённости рельефа). Выбор параметров для оценки вероятности развития эрозионных процессов на территории Архангельской области осуществлялся эмпирическим путём.

В результате объединения полигонов минимальных, средних и максимальных значений угла наклона, LS-фактора и индекса расчленённости рельефа получена сводная карта вероятности развития потенциально опасных экзогенных процессов на территории Архангельской области (рис. 2, см. с. 99). На карте выделены следующие зоны:

- 1) с наибольшей вероятностью проявления эрозионных процессов, соответствующие зонам сноса материала (зона 1);
- 2) с возможным проявлением эрозионных процессов, соответствующие зонам транзита материала (зона 2);
- 3) с потенциальным развитием аккумулятивных процессов, соответствующие зонам накопления материала, в том числе и загрязняющих веществ (зона 3).

В зоне 3 на основе максимальных значений индекса влажности выделены:

- подзона 3А — территории, склонные к подтоплению во время паводков;
- подзона 3Б — территории, предрасположенные к заболачиванию (рис. 3, см. с. 99).

Для каждой полученной зоны были посчитаны средние значения применяемых геоморфометрических параметров и площадные характеристики (см. таблицу). Преобладающим для области является процесс аккумуляции материала. Зона накопления приурочена к понижениям в рельефе и совпадает с поймами крупных рек.

Зоны потенциального подтопления и заболачивания (см. рис. 3б) пространственно согласуются с картой плотности болот Архангельской области (Губайдуллин, 2002), приведённой на рис. 4а (см. с. 100), и картой прямой солнечной инсоляции, где территории максимальной увлажнённости соответствуют наименее прогретым участкам (рис. 4б).

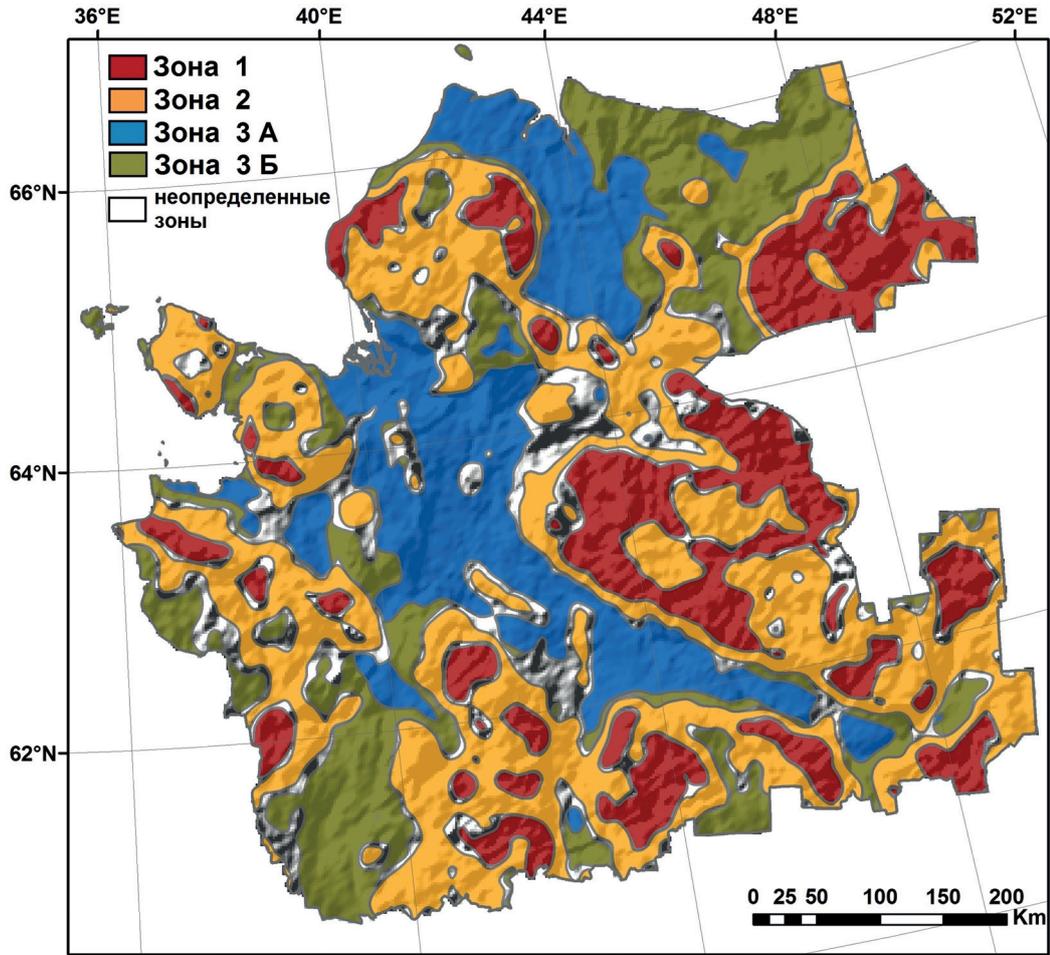


Рис. 2. Карта вероятности проявления потенциально опасных процессов на территории Архангельской области: зона 1 — снос, зона 2 — транзит, зона 3 — аккумуляция; 3А — территории, склонные к подтоплению во время паводков, 3Б — территории, предрасположенные к заболачиванию

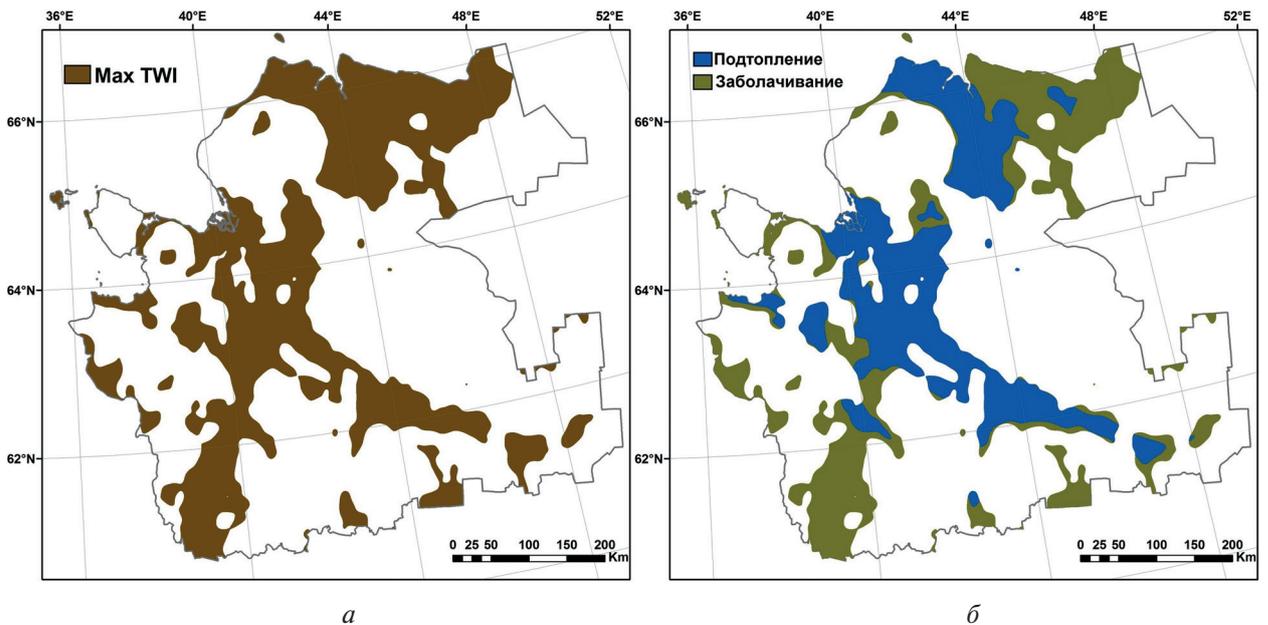


Рис. 3. Объединённый полигон минимальных значений угла наклона, LS-фактора, индекса расчленённости рельефа и максимальных значений индекса влажности (а) и выделенные зоны, предрасположенные к подтоплению во время паводков (синий цвет) и заболачиванию (тёмно-зелёный цвет) (б)

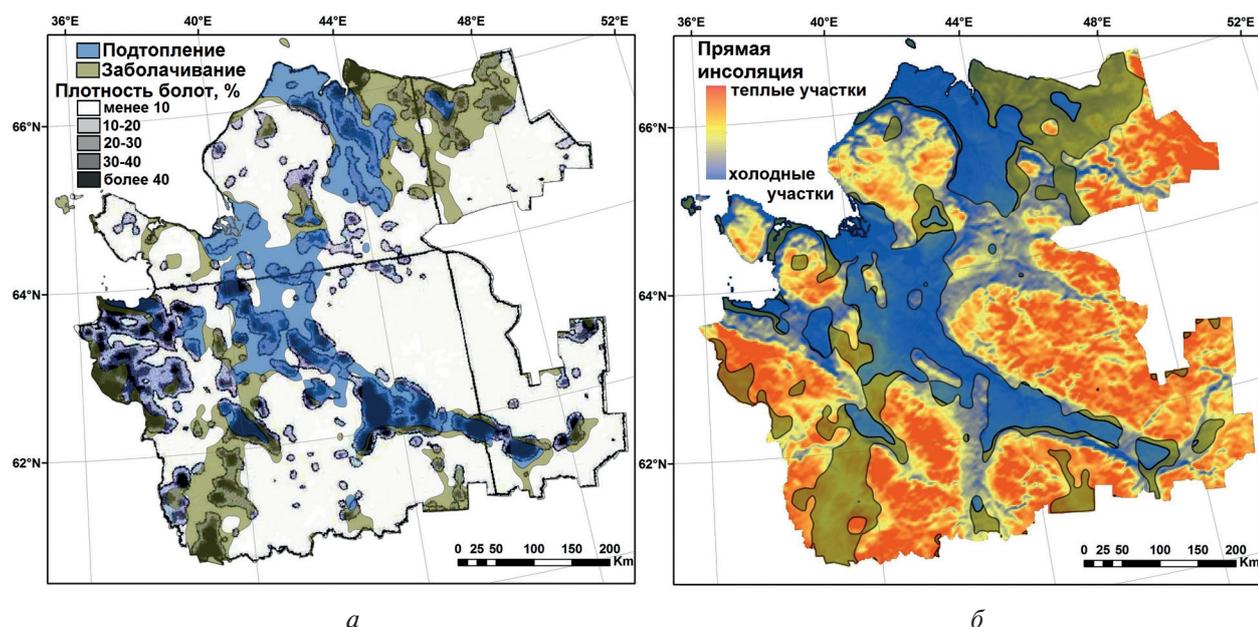


Рис. 4. Сопоставление карты зон подтопления и заболачивания с картами плотности болот (а) и прямой солнечной инсоляции (б)

Средние значения параметров для каждой зоны вероятного развития экзогенных процессов на территории Архангельской области

Параметр	Зоны		
	1	2	3
Высота, м	143,92	123,41	66,47
Угол наклона, град	1,44	0,96	0,58
Индекс расчленённости	1,48	0,99	0,61
LS-фактор	1,08	0,59	0,29
Индекс влажности	13,84	14,51	15,39
Прямая инсоляция, кВт/м ²	160,68	160,52	160,00
Площадь, км ² /%	106 966/18,21	194 606/33,13	205 002/34,90
Неопределённые зоны, км ² /%	80 826/13,76		

Выводы

1. На основе объединения кластеров максимальных значений угла наклона, LS-фактора, индекса расчленённости рельефа выделены участки с максимальной вероятностью развития эрозионных процессов, соответствующие зонам сноса материала и составляющие порядка 18 % исследуемой территории.
2. На основе объединения кластеров средних значений тех же параметров выделены участки с вероятным проявлением эрозионных процессов, соответствующие зонам транзита материала и составляющие порядка 33 % территории.
3. На основе объединения кластеров минимальных значений указанных параметров выделены участки с потенциальным развитием аккумулятивных процессов, соответствующие зонам накопления материала и составляющие порядка 35 % территории исследования.
4. В зоне аккумуляции на основе максимальных значений топографического индекса влажности выделяются территории, склонные к подтоплению во время паводков и предрасположенные к заболачиванию.

Выявленные на основе геоморфометрического анализа особенности территории следует учитывать при её хозяйственном освоении, разработке месторождений, строительстве дорог, развитии инфраструктуры, вырубке лесов и прочей антропогенной деятельности.

Исследование осуществлено в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА РАН, государственная регистрация № 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».

Литература

1. Губайдуллин М. Г. Геоэкологические условия освоения минерально-сырьевых ресурсов Европейского Севера России. Архангельск: Поморский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, 2002. 310 с.
2. Карта районирования территории России по степени экстремальности развития эколого-геоморфологических ситуаций / под ред. А. Е. Козлова, Г. П. Локшина, И. В. Чеснокова. М.: ДМВ, 2006.
3. Кочкуркин Н. В., Кутинов Ю. Г. О возможности применения аэрофотосъемки в экологических целях на территории Архангельской области. Факты и соображения // Север: экология. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 351–363.
4. Кутинов Ю. Г., Боголицын К. Г., Чистова З. Б. Исследования северных территорий Земли из космоса: проблемы, свойства, состояние, возможности на примере МКС-Арктика. В 3-х т. Екатеринбург: УрО РАН, 2012.
5. Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б., Полякова Е. В. Выбор цифровой модели рельефа северных арктических территорий РФ для геоэкологического районирования // География арктических регионов 2017. СПб.: Типография ООО «Старый город», 2017. С. 160–163.
6. Кутинов Ю. Г., Полякова Е. В., Чистова З. Б., Минеев А. Л., Мырцева Е. А. Вероятность проявления эрозионных процессов на территории Архангельской области на основе цифрового моделирования рельефа // Риски и безопасность в стремительно меняющемся мире: материалы 6-й Международной науч. конф. Прага: Социосфера, 2018. С. 44–48.
7. Минеев А. Л., Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. (2015а) 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., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Полякова Е. В. (2015б) Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Пространство и Время. 2015. № 3(21). С. 278–291.
9. 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.
10. 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. URL: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>.
11. Опасные экзогенные процессы / под ред. В. И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
12. Познанин В. Л. Эрозионные процессы в криолитозоне // Пространство и Время. 2012. № 1(7). С. 127–132.
13. Полякова Е. В. Геоморфометрический подход в геоэкологических исследованиях северных территорий страны // Успехи современного естествознания. 2018. № 3. С. 117–122. URL: <https://doi.org/10.17513/use.36712>.
14. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Минеев А. Л. Оценка вероятности проявления природных экзогенных геологических процессов на основе цифрового моделирования рельефа // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. М.: ГЕОС, 2016. С. 684–688.
15. Проблемы классифицирования склоновых гравитационных процессов / под ред. М. В. Чуринова, Е. А. Толстых. М.: Наука, 1985. 204 с.
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”. Durham, England: Department of Geography, University of Durham, 1975. 24 p.

17. *Forgy E.* Cluster analysis of multivariate data: Efficiency versus interpretability of classifications // *Biometrics*. 1965. V. 21. P. 768–769.
18. *Huggett R. J., Cheesman J.* Topography and the Environment. Harlow: Pearson Education, 2002. 274 p.
19. *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. URL: <http://dx.doi.org/10.20982/tqmp.09.1.p015>.
20. *Polyakova E., Gofarov M., Kutinov Yu., Beljaev V., Chistova Z., Neverov N., Staritsyn V., Mineev A., Duryinin S.* Erosion processes in karst landscapes of the Russian plain northern taiga, based on digital elevation modelling // *J. Mountain Science*. 2016. V. 13(4). P. 569–580. URL: <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3642-3>.
21. *Shary P. A., Sharaya L. S., Mitusov A. V.* The problem of scale-specific and scale-free approaches in geomorphometry // *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. 2005. V. 28(1). P. 81–101.
22. *Vatti B. R.* A generic solution to polygon clipping // *Communications of the ACM*. 1992. V. 35(7). P. 56–63. URL: <http://dx.doi.org/10.1145/129902.129906>.

Digital elevation model in the estimation of the probability of the erosion processes in the northern regions of the country

E. V. Polyakova, Yu. G. Kutinov, A. L. Mineev, Z. B. Chistova

*N. P. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research RAS
Arkhangelsk 163000, Russia
E-mail: lenpo26@yandex.ru*

It is believed that exogenous processes take place slowly and are poorly reflected in relief forms in flat forest areas. However, the situation radically changes when the integrity of the vegetation cover is violated, which is inevitable with modern methods of economic development of the northern territories. In the paper, the authors estimated the probability of development of erosion processes on the basis of such geomorphometric relief parameters as the slope (Slope), LS factor (LS factor), relief dissection index (TRI) and topographic humidity index (TWI) calculated on the basis of a digital relief model Arkhangelsk region. After the procedure of generalization and cluster analysis, the study area was divided into three classes — the minimum, average and maximum values of the selected parameters. On the basis of combining the contours of cluster values of parameters in the study area, three zones were identified: with the greatest likelihood of development of erosion processes, corresponding to the zones of material demolition; with the possible manifestation of erosion processes corresponding to the transit zones of the material; with potential development of accumulative processes, corresponding to the zones of accumulation of material, including pollutants. In the accumulation zone, areas prone to flooding during floods and predisposed to waterlogging were identified. Identified on the basis of the geomorphometric analysis, the peculiarities of the territory should be taken into account when planning and implementing economic activities.

Keywords: digital elevation model, geomorphometric parameters, geomorphometric analysis, erosion processes

Accepted: 06.12.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104

References

1. *Gubaidullin M. G., Geoekologicheskie usloviya osvoeniya mineral'no-syr'evykh resursov Evropeiskogo Severa Rossii* (Geoenvironmental conditions for the development of mineral resources in the European North of Russia), Arkhangelsk: Pomorskii gosudarstvennyi universitet, 2002, 310 p.
2. *Karta raionirovaniya territorii Rossii po stepeni ekstremal'nosti razvitiya ekologo-geomorfologicheskikh situatsii* (Map of the regionalization of the territory of Russia in terms of the degree of extreme development of ecological-geomorphological situations), Kozlov A. E., Lokshin G. P., Chesnokov I. V. (eds.), Moscow: DMB, 2006.

3. Kochkurkin N. V., Kutinov Yu. G., O vozmozhnosti primeneniya aerofotos'emki v ekologicheskikh tselyakh na territorii Arkhangel'skoi oblasti. Fakty i soobrazheniya (On the possibility of using aerial photography for environmental purposes in the Arkhangelsk region. Facts and considerations), In: *Sever: ekologiya* (North: Ecology), Ekaterinburg: UrO RAN, 2000, pp. 351–363.
4. Kutinov Yu. G., Bogolitsyn K. G., Chistova Z. B., *Issledovaniya severnykh territorii Zemli iz kosmosa: problemy, svoystva, sostoyanie, vozmozhnosti na primere MKS-Arktika* (Studies of the northern territories of the Earth from space: problems, properties, state, opportunities by the example of the ISS-Arctic: Arctic: In 3 vol.), Ekaterinburg: UrO RAN, 2012.
5. Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Polyakova E. V., Vybortsfirovoi modeli rel'efa severnykh arkticheskikh territorii RF dlya geoekologicheskogo raionirovaniya (Selection of a digital elevation model of the northern Arctic territories of the Russian Federation for geo-ecological zoning), In: *Geografiya arkticheskikh regionov 2017* (Geography of Arctic regions 2017), Saint Petersburg: Tipografiya OOO "Staryi gorod", 2017, pp. 160–163.
6. Kutinov Yu. G., Polyakova E. V., Chistova Z. B., Mineev A. L., Myrtseva E. A., Veroyatnost' proyavleniya erozionnykh protsessov na territorii Arkhangel'skoi oblasti na osnove tsifrovogo modelirovaniya rel'efa (The probability of erosion processes in the Arkhangelsk region on the basis of digital elevation modeling), *Riski i bezopasnost' v stremitel'no menyayushchemsya mire* (Risks and safety in rapidly changing world), Proc. 6th Intern. Scientific Conf., Prague: Vědecko vydavatelské centrum "Sociosféra-CZ", 2018, pp. 44–48.
7. Mineev A. L., Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B. (2015a), Metodicheskie aspekty sozdaniya tsifrovoy modeli rel'efa Arkhangel'skoi oblasti na osnove ASTER GDEM V.2 (Methodical aspects of creating a digital elevation model of the Arkhangelsk region based on ASTER GDEM V.2), *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, No. 2, available at: www.science-education.ru/129-21949.
8. Mineev A. L., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Polyakova E. V. (2015b), Podgotovka tsifrovoy modeli rel'efa dlya issledovaniya ekzogennykh protsessov severnykh territorii Rossiiskoi Federatsii (Preparation of a digital elevation model for the study of exogenous processes in the northern territories of the Russian Federation), *Prostranstvo i Vremya*, 2015, No. 3(21), pp. 278–291.
9. 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 (Geoecological zoning of the territory of the Arkhangelsk region using digital elevation models and GIS technologies), *Prostranstvo i Vremya*, 2017, No. 2–4(28–30), pp. 267–288.
10. Mineev A. L., Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Nadezhnost' tsifrovoy modeli rel'efa Arkhangel'skoi oblasti dlya provedeniya geoekologicheskikh issledovaniy (The reliability of a digital elevation model of the Arkhangelsk region for geoecological research), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 58–67, available at: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>.
11. *Opasnye ekzogennye protsessy* (Dangerous exogenous processes), Osipov V. I. (ed.), Moscow: GEOS, 1999, 290 p.
12. Poznanin V. L., Erozionnye protsessy v kriolitozone (Erosion processes in the cryolithozone), *Prostranstvo i Vremya*, 2012, No. 1(7), pp. 127–132.
13. Polyakova E. V., Geomorfometricheskii podkhod v geoekologicheskikh issledovaniyakh severnykh territorii strany (Geomorphometric approach in geoecological studies of the northern territories of the country), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, No. 3, pp. 117–122, available at: <https://doi.org/10.17513/use.36712>.
14. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Mineev A. L., Otsenka veroyatnosti proyavleniya prirodnnykh ekzogennykh geologicheskikh protsessov na osnove tsifrovogo modelirovaniya rel'efa (Estimation of the probability of natural exogenous geological processes on the basis of digital elevation modeling), *Sergeevskie chteniya. Inzhenernaya geologiya i geoekologiya*, Moscow: GEOS, 2016, pp. 684–688.
15. *Problemy klassifitsirovaniya sklonovykh gravitatsionnykh protsessov* (Classification problems slope gravitational processes), Churinov M. V., Tolstykh E. A. (eds.), Moscow: Nauka, 1985, 204 p.
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", Durham, England: Department of Geography, University of Durham, 1975, 24 p.
17. Forgy E., Cluster analysis of multivariate data: Efficiency versus interpretability of classifications, *Biometrics*, 1965, Vol. 21, pp. 768–769.
18. Huggett R. J., Cheesman J., *Topography and the Environment*, Harlow: Pearson Education, 2002, 274 p.
19. Morissette L., Chartier S., The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica, *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 2013, Vol. 9, No. 1, pp. 15–24, available at: <http://dx.doi.org/10.20982/tqmp.09.1.p015>.

20. Polyakova E., Gofarov M., Kutinov Yu., Belyaev V., Chistova Z., Neverov N., Staritsyn V., Mineev A., Durynin S., Erosion processes in karst landscapes of the Russian plain northern taiga, based on digital elevation modelling, *J. Mountain Science*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 569–580, available at: <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3642-3>.
21. Shary P. A., Sharaya L. S., Mitusov A. V., The problem of scale-specific and scale-free approaches in geomorphometry, *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 2005, Vol. 28, No. 1, pp. 81–101.
22. Vatti B. R., A generic solution to polygon clipping, *Communications of the ACM*, 1992, Vol. 35, No. 7, pp. 56–63, available at: <http://dx.doi.org/10.1145/129902.129906>.