УДК 551.4:502.64

**ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ****Полякова Е.В.***Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН, Архангельск,
e-mail: lenpo26@yandex.ru*

Вплоть до 1990-х гг. топографические карты являлись основным источником количественной информации о рельефе. По мере развития космических и компьютерных технологий, цифровое моделирование рельефа оформилось в самостоятельную научную дисциплину – геоморфометрию, изучающую количественное моделирование и анализ рельефа дневной поверхности, а также взаимосвязи между рельефом и другими естественными и антропогенными компонентами геосистем. Интенсивное хозяйственное освоение северных территорий страны часто приводит к активизации природных процессов или развитию новых опасных явлений, которые ранее здесь отсутствовали. Осуществление всех видов деятельности, обеспечивающих недропользование в северных регионах РФ, включая геологоразведочные, проектно-изыскательские, строительные, эксплуатационные работы, сталкивается с серьезными трудностями в плане почти полного отсутствия актуальной, точной геопространственной информации об опасных процессах и явлениях. Количественные характеристики рельефа (геоморфометрические параметры), рассчитываемые по матрицам высот, служат в качестве основы для прогнозирования целого ряда экзогенных процессов (эрозионных, деструктивных, аккумулятивных и пр.), позволяют оценивать вероятность и интенсивность их развития. Получение такой информации крайне необходимо для обеспечения промышленной и экологической безопасности в процессе освоения и эксплуатации месторождений, развития инфраструктуры, строительство дорог и пр. видов хозяйственной деятельности человека. В статье показана возможность проведения геоэкологических исследований средствами цифрового моделирования рельефа. Геоморфометрический подход в геоэкологических исследованиях осуществляется по следующему алгоритму: Выбор ЦМР – Выбор программного обеспечения – Подготовка ЦМР – Выбор геоморфометрических параметров – Проведение геоморфометрического анализа по выбранным параметрам – Составление карт прогнозно-вероятностного моделирования. Геоморфометрический подход является неотъемлемой частью геоэкологических исследований в силу своей доступности, объективности, способности охвата больших территорий одновременно.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, геоморфометрические параметры, геоморфометрический анализ**GEOMORPHOMETRIC APPROACH IN GEOECOLOGICAL RESEARCH
OF THE NORTHERN TERRITORIES OF THE COUNTRY****Polyakova E.V.***Federal Center for Integrated Arctic Research RAS, Arkhangelsk, e-mail: lenpo26@yandex.ru*

Up to the 90s of the 20th century, topographic maps were the main source of quantitative information on the relief. With the development of space and computer technologies, digital modeling of the relief has formed into an independent scientific discipline – geomorphometry, which studies the quantitative modeling and analysis of the relief of the day surface, as well as the relationship between the relief and other natural and anthropogenic components of geosystems. Intensive economic development of the northern territories of the country often leads to the activation of natural processes or the development of new dangerous phenomena that were previously absent here. The implementation of all types of activities that provide subsoil use in the northern regions of the Russian Federation, including geological exploration, design and survey, construction, and operation, faces serious difficulties in terms of the almost complete absence of relevant, accurate geospatial information on hazardous processes and phenomena. The quantitative characteristics of the relief (geomorphometric parameters), calculated from the altitude matrices, serve as a basis for predicting a number of exogenous processes (erosive, destructive, accumulative, etc.), allow us to estimate the probability and intensity of their development. Obtaining such information is extremely necessary to ensure industrial and environmental safety in the process of development and exploitation of deposits, infrastructure development, construction of roads and other types of human economic activities. The article shows the possibility of carrying out geoeological research using digital relief modeling. Geomorphometric approach in geoeological research is carried out according to the following algorithm: DEM selection – Software selection – Preparation of DEM – Selection of geomorphometric parameters – Geomorphometric analysis for selected parameters – Preparation of predictive-probability modeling maps. Geomorphometric approach is an integral part of geoeological research due to its accessibility, objectivity, ability to cover large areas at a time.

Keywords: digital elevation model, geomorphometric parameters, geomorphometric analysis

Рельеф является одним из основных факторов, определяющих ход и направленность процессов, протекающих в приповерхностном слое планеты. Большинство эколого-геохимических процессов зависят от поступления в каждую точку пространства влаги и солнечной энергии, их распределе-

ние регулируется наклоном и экспозицией склонов. Направление распространения загрязняющих веществ, зоны их возможного накопления и смыва определяют параметры рельефа. Вместе с тем, будучи результатом взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов, рельеф выступает индикато-

ром геологического строения территории. В этой связи информация о рельефе широко применяется в науках о Земле, инженерных изысканиях, проектировании и строительстве [1–2].

Вплоть до 1990-х гг. топографические карты являлись основным источником количественной информации о рельефе. По мере развития космических и компьютерных технологий, цифровое моделирование рельефа оформилось в самостоятельную научную дисциплину – геоморфометрию, изучающую количественное моделирование и анализ рельефа дневной поверхности, а также взаимосвязи между рельефом и другими естественными и антропогенными компонентами геосистем [1].

В то же время возможности цифрового моделирования рельефа в геоэкологических исследованиях, особенно северных (приарктических и арктических) территорий страны используются крайне недостаточно.

В России цифровое моделирование рельефа и геоморфометрический анализ приобрели популярность в начале XXI века. Несомненными лидерами в этом направлении исследований являются И.В. Флоринский и П.А. Шарый.

Цель исследования: показать возможность применения геоморфометрического анализа цифровой модели рельефа для геоэкологических исследований северных регионов страны.

Материалы работ и обсуждения

Методика проведения геоэкологических исследований осуществляется по алгоритму, представленному на рис. 1.

Рис. 1. Блок-схема методики проведения геоэкологических исследований на основе цифрового моделирования рельефа

Блок 1. Под цифровой моделью какого-либо геометрического (географического) объекта понимается определенная форма представления исходных данных и способ их структурного описания, позволяющий «вычислять» (восстанавливать) объект путем интерполяции, аппроксимации или экстраполяции [3]. ЦМР – это растровое представление непрерывной поверхности Земли (в случае, если рассматривается земная поверхность). Выбор ЦМР для исследований должен базироваться, прежде всего, на таких параметрах, как доступность, пространственное разрешение и охват территории (таблица).

Обзор глобальных некоммерческих цифровых моделей рельефа

ЦМР	Пространственное разрешение		Охват территории Земли
	угловые секунды	метры	
GTOPO30	30"	~900	от 90° с.ш. до 90° ю.ш.
GLOBE	30"	~900	от 90° с.ш. до 90° ю.ш.
ETOPO 2	30"	~900	от 90° с.ш. до 90° ю.ш.
GMTED2010	7,5"	~225	от 84° с.ш. до 56° ю.ш.
SRTM 3	3"	~90	от 60° с.ш. до 56° ю.ш. (80% поверхности земного шара)
ACE2	3"	~90	от 90° с.ш. до 90° ю.ш., и от 180° в.д. до 180° з.д.
SRTM 1	1"	~30	от 60° с.ш. до 56° ю.ш. (80% поверхности земного шара)
ASTER GDEM V.2	1"	~30	от 83° с.ш. до 83° ю.ш. (99% поверхности земного шара)

ЦМР высокого разрешения (NEXTMap World 30, WorldDEM™, AW3D) являются коммерческими продуктами и доступны не всем пользователям в силу своей дороговизны. Свободные (некоммерческие) ЦМР могут удовлетворять по пространственному разрешению, но не содержать данных на интересующую исследователя территорию. Например, модель SRTM не покрывает северные (выше 60° северной широты) территории. Поэтому для северных регионов страны лучше всего подходит ASTER GDEM V.2.

Блок 2. Существует достаточное количество программных продуктов, реализующих функции геоморфометрического анализа рельефа. В целом все они обладают схожим набором возможностей, но одни программные продукты фокусируются на решении частных задач, например расчет характеристик рельефа в SAGA GIS, а другие охватывают широкий круг задач, тем самым претендуя на универсальность (ESRI ArcGIS). Выбор обычного потребителя основывается в первую очередь на доступности программного продукта. Наиболее используемые для геоморфометрического анализа рельефа и находящиеся в свободном доступе такие программные продукты, как SAGA GIS (группа модулей Terrain Analysis), GRASS (модуль g.param.scale), QGIS (использует модули SAGA GIS и GRASS), gvSIG (набор инструментов SEXTANTE). Среди коммерческих продуктов – это ESRI ArcGIS (модуль Spatial

Analyst), MapInfo Professional (модуль Vertical Mapper). Для проведения геоморфометрического анализа хорошо подходит SAGA GIS, поскольку обладает расширенной линейкой инструментов расчета геоморфометрических параметров.

Блок 3. Подготовка выбранной ЦМР – важный и ответственный этап, поскольку от этого будет зависеть качество дальнейшего получаемого материала. Глобальные ЦМР имеют наличие таких артефактов, как резкие понижения (впадины) и повышения (пики), которые нужно устранять перед началом работы с моделью. В большинстве случаев наличие данных артефактов обусловлено экранированием территории облаками, недостаточным количеством наблюдений, отражением континентальных водоемов и несовпадений между цифровыми моделями, используемыми для построения глобальной модели [4]. При разработке ASTER GDEM V.2 на территорию России большинство артефактов были удалены разработчиками, но на их месте образовались пустоты, области отсутствующих данных. Пустоты можно заполнять данными других моделей, например GMTED2010, искусственно уменьшая размер ячейки до 1 угловой секунды (разрешение ASTER GDEM V.2). Подробно методика подготовки ЦМР Архангельской области описана в [5–6]. Проведение геоморфометрического анализа на «сырой» неподготовленной модели будет давать ложные результаты (рис. 2).

Рис. 2. Результат расчета угла наклона поверхности на исходной модели ASTER GDEM V.2 (А) и подготовленной ЦМР Архангельской области [5]

Блок 4. Существуют различные классификации геоморфометрических параметров.

И.В. Флоринский и П.А. Шарый [7–8] выделяют четыре основные группы морфометрических величин:

1) локальные (крутизна, экспозиция, горизонтальная и вертикальная кривизны склона);

2) нелокальные (водосборная и дисперсивная площади);

3) солярные (отражательная способность, инсоляция);

4) комбинированные (топографический индекс, индекс мощности потоков).

По методике характеристики рельефа Дж. Вуда [9] вся поверхность анализируется по таким морфометрическим параметрам, как угол наклона, поперечная, максимальная и минимальная кривизны, затем классифицируются в 6 морфометрических типов: 1 – плоские поверхности (Plane), 2 – впадины (Pit), 3 – каналы (Channel), 4 – проходы (перевалы) (Pass (saddle)), 5 – хребты (Ridge), 6 – пики (Peak).

В данном случае для исследования северных территорий выбран программный комплекс SAGA GIS, модули анализа рельефа в котором согласуются с классификацией геоморфометрических параметров, приведенной в статье [10].

Выделяются следующие группы геоморфометрических параметров:

1. Геометрические – группа параметров, описывающих морфологические особенности территории, которые определяют динамику склоновых процессов, скорость и интенсивность потоков вещества и энергии. К этой группе относятся угол наклона, экспозиция склона, различные виды кривизн земной поверхности.

2. Гидрологические – группа параметров, оценивающих поверхностный сток, степень увлажнения почвы и перемещения обломочного материала. Сюда относятся такие параметры, как общая и удельная водосборные площади, направленность потоков, бассейновое моделирование, топографический индекс влажности, показатели плоскостного и линейного эрозионного потенциала, предрасположенность склонов к развитию осыпных процессов, оценка зон потенциального затопления и т.д.

3. Топографо-микrokлиматические – группа показателей, показывающих влияние земной поверхности на территориальные особенности распределения солнечной радиации, формирование температурного режима и воздействия ветра.

К данной группе относятся потенциальная солнечная радиация и инсоляция, фотосинтетически активная радиация, распределение температуры земной поверхности, ветровой эффект и др.

4. Вертикальная дифференциация природной среды. Данные параметры применяются для количественной оценки неоднородностей рельефа. Сюда относятся индекс расчлененности рельефа, глубина речной долины и т.п.

Выбор параметров должен определяться поставленными для решения задачами.

Блок 5. Геоморфометрический анализ проводится по выбранным параметрам или группам параметров с использованием инструментально-математических возможностей программного обеспечения (в данном случае SAGA GIS). В результате формируется комплект монофакторных карт (рис. 3), каждая из которых характеризует территорию с точки зрения предпосылок рельефа, иллюстрируя зоны сноса, транзита и накопления осадочного материала, степень закарстованности, увлажненности и расчлененности. 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 использовать комбинации параметров и, применив ряд логических и математических процедур, проводить вероятностное моделирование проявления экзогенных геологических процессов.

Блок 6. Карты прогнозно-вероятностного моделирования составляются для оценки вероятности проявления тех или иных опасных экзогенных процессов. Их составление основывается на сочетании нескольких параметров, отвечающих за проявление одного процесса или ряда генетически связанных процессов и явлений. Так, например, сочетание таких параметров, как угол наклона, LS-фактор и индекс расчлененности рельефа, позволяют выделить зоны максимальной вероятности проявления эрозионных процессов, зоны транзита и аккумуляции осадочного материала. Для выделения территорий, склонных к подтоплению во время паводков и общей тенденции к заболачиванию, помимо трех перечисленных параметров следует использовать метод кластеризации индекса влажности.

Рис. 3. Пример набора монофакторных карт, составленных по геоморфометрическим параметрам рельефа в программном продукте SAGA GIS

Для выявления локальных участков предрасположенных к аккумуляции загрязняющих веществ необходимо использовать сочетание кривизн. Неплохие результаты показывает сумма горизонтальной и вертикальной кривизн (классификация Треха). Естественно, простое сопоставление карт не дает возможности прямого выделения подобных зон. Вначале проводится кластерный анализ по каждому параметру, чтобы сгруппировать значения в кластеры. Далее проводится операция генерализации с целью объединения прерывистых и раздробленных контуров кластеров. Генерализация, несомненно, приводит к потере данных, но для больших территорий это является скорее плюсом, поскольку позволяет сформировать определенное представление о масштабах развития процессов.

Выводы

Интенсивное хозяйственное освоение территорий часто приводит к активизации природных процессов или развитию новых опасных явлений, которые ранее здесь отсутствовали. Осуществление всех видов деятельности, обеспечивающих недропользование в северных регионах РФ, включая геологоразведочные, проектно-изыскательские, строительные, эксплуатационные работы, сталкивается с серьезными трудностями в плане почти полного отсутствия актуальной, точной геопроостранственной информации об опасных процессах и явлениях. Геоморфометрические параметры рельефа могут выступать в качестве источника для прогнозирования целого ряда экзогенных процессов (эрозионных, деструктивных, аккумулятивных и пр.), позволяют оценивать вероятность и интенсивность их развития. Получение такой информации крайне необходимо для обеспечения промышленной

и экологической безопасности в процессе освоения и эксплуатации месторождений, развития инфраструктуры, строительстве дорог и пр. видов хозяйственной деятельности человека.

Таким образом, геоморфометрический подход является неотъемлемой частью геоэкологических исследований в силу своей доступности, объективности, способности охвата больших территорий одновременно.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА РАН № гос. регистрации АААА-А18-118012390305-7.

Список литературы

1. Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: дис. ... д-ра техн. наук. — Пушино, 2010. — 267 с.
2. Pike R.J. A bibliography of terrain modeling (geomorphometry), the quantitative representation of topography, Suppl. 4.0. Open-file Rep. 02-465. Menlo Park: USGS, 2002. — 157 p.
3. Новаковский Б.А. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей / Б.А. Новаковский, С.В. Прасолов, А.И. Прасолова. — М.: Научный мир, 2003. — 64 с.
4. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 — Summary of Validation Results / Tachikawa T. [et al.]. August 31, 2011. http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver-2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf. (дата обращения: 05.01.2018).
5. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации / А.Л. Минеев [и др.] // Пространство и время. — 2015. — № 3(21). — С. 278–291. URL: https://space-time.ru/space-time/article/view/2226-7271prov_st3-21.2015.83. (дата обращения: 05.01.2018).
6. Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V. 2 / А.Л. Минеев [и др.] // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 2. URL: www.science-education.ru/129-21949 (дата обращения: 05.01.2018).
7. Флоринский И.В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию / И.В. Флоринский // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. — 2016. — Т. 11. — Вып. 1: Система планета Земля. URL: http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/2227-9490e-aprov_e-ast11-1.2016.71.php. (дата обращения: 05.01.2018).
8. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental Quantitative Methods of Land Surface Analysis // Geoderma. —

2002. – Vol. 107(1–2). – P. 1–32. DOI 10.1016/S0016-7061(01)00136-7.

9. Wood J.D. The geomorphological characterisation of digital elevation models. Ph.D. Thesis. Leicester: Univ. Leicester, 1996. – 193 p.

10. Глотов А.А. Использование ЦМР для эффективного управления природопользованием / А.А. Глотов // Геоматика. – 2013. – № 4. – С. 32–36.

References

1. Florinskii I.V. Teoriia i prilozheniia matematiko-kartograficheskogo modelirovaniia rel'efa [Theory and applications of mathematical and cartographic modeling of relief]. Pushchino, Dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk, 2010, 267.

2. Pike R.J. A bibliography of terrain modeling (geomorphometry), the quantitative representation of topography. Menlo Park, USGS, 2002, 157 p.

3. Novakovskii B.A., Prosalov S.V., Prosalova A.I. Tsifrovye modeli rel'efa real'nykh i abstraktnykh geopolei [Digital elevation models of real and abstract geofields]. Moscow, Nauchnyi mir, 2003, 64.

4. Tachikawa T. ASTER Global Digital Elevation Model. Available at: http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf (accessed 5 January 2018).

5. Mineev A.L., Kutinov Iu.G., Chistova Z.B., Poliakova E.V. Building the Digital Elevation Model for Studying Exogenous Processes across Northern Territories of Russian Federation [Podgotovka tsifrovoy modeli rel'efa dlia issledova-

niia ekzogennykh protsessov severnykh territorii Rossiiskoi Federatsii]. Prostranstvo i Vremia - Space and Time, 2015, vol. 21, no. 3. available at: https://space-time.ru/space-time/article/view/2226-7271prov_st3-21.2015.83. (accessed 05.01.2018).

6. Mineev A.L., Poliakova E.V., Kutinov Iu.G., Chistova Z.B. Methodical Aspects of Creating Digital Elevation Models of the Arkhangel'sk Region Based on ASTER GDEM V. 2 [Metodicheskie aspekty sozdaniia tsifrovoy modeli rel'efa Arkhangel'skoi oblasti na osnove ASTER GDEM V. 2]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia - Modern Problems of Science and Education, 2015, vol. 2, no. 2. available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21949>. (accessed 05.01.2018).

7. Florinskii I.V. An Illustrated Introduction to Geomorphometry [Illustrirovannoe vvedenie v geomorfometrii]. Elektronnoe nauchnoe izdanie Al'manakh Prostranstvo i Vremia. – Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time, 2016, vol. 11, no. 1. available at: http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/2227-9490e-aprov_e-ast11-1.2016.71.php. (accessed 05.01.2018).

8. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental Quantitative Methods of Land Surface Analysis. Geoderma, 2002, vol. 107, no. 1, pp. 1–32. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7.

9. Wood J.D. The geomorphological characterisation of digital elevation models. Ph.D. Thesis. Leicester: Univ. Leicester, 1996, 193 p.

10. Glotov A.A. Application of DEM for tasks of rational nature management and monitoring of natural processes [Ispol'zovanie TsMR dlia effektivnogo upravleniia prirodnopol'zovaniem]. Geomatika - Geomatics, 2013, no. 4, pp. 32–36.