

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И ЕГО ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

М. Е. Гуляй, А. Л. Киндеев

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, iexakshalf@gmail.com*

В работе приведены результаты применения методики спектрального анализа для определения иерархических уровней рельефа территории Республики Беларусь. В результате исследования выделены 9 иерархических уровней рельефа и получены карты, отображающие формы рельефа каждого уровня. Обнаружено соотношение расположения крупнейших форм рельефа и глубины залегания кристаллического фундамента.

Ключевые слова: масштаб; иерархия; пространственный анализ; спектральный анализ; генезис рельефа; соподчинённость.

SPECTRAL ANALYSIS OF THE RELIEF OF THE REPUBLIC OF BELARUS AND ITS GEOINFORMATION INTERPRETATION

M. E. Gulyay, A. L. Kindeev

*Belarusian State University, Nezavisimosti Av., 4,
220030, Minsk, Belarus, iexakshalf@gmail.com*

The paper presents results the use of spectral analysis techniques to determine the hierarchical levels of the relief of the territory of the Republic of Belarus. As a result of the study, 9 hierarchical relief levels were identified and maps showing the relief forms of each level were obtained. Discovered the relationship between the location of the largest relief forms and the depth of the crystalline basement.

Keywords: scale; hierarchy; spatial analysis; spectral analysis; relief genesis; subordination.

Иерархическая организация природы есть прямое следствие закона преобразования энергии и информации. Форма перераспределения вещества, энергии и информации определяется конкретными механизмами. В физических системах они связываются с различными формами нелинейной динамики и порождают дискретно-волновые структуры в соответствующей полосе пространственно-временных частот – иерархические уровни [1]. В географическом смысле иерархические уровни есть масштаб, в пределах которого какие-либо факторы порождают объекты или явления. В рамках исследования это масштаб проявления геоморфологических факторов и форм рельефа.

Практический смысл пространственного анализа через призму теории сигнала заключается в выявлении правил, порождающих иерархию, и использовании этих правил для решения практических задач согласования изображений на картах различного масштаба, выбора масштаба для составления физических и иных карт различного целевого назначения, для создания основы для изучения и описания механизмов, порождающих иерархию, для определения морфометрических характеристик различных форм рельефа и на основе этого прогнозирование его дальнейшего развития (например, протекания эрозионных и гравитационных процессов) [2].

Вопрос о методах генерализации рельефа на картографических произведениях возник вместе с появлением картографии как дисциплины и не теряет актуальности до сих пор. Также остро стоит вопрос о генерализации рельефа при прогнозном моделировании различных природных явлений, для которых рельеф выступает в качестве среды и/или фактора. Исходя из актуальности вышеописанных вопросов, исследование ставит целью апробацию методики спектрального анализа рельефа применительно к территории Республики Беларусь.

В качестве исходных данных для спектрального анализа была использована цифровая модель рельефа (ЦМР) Airbus WorldDEM4Ortho с пространственным разрешением (размером ячейки) в 50 м, абсолютной вертикальной точностью <4 м [3]. Из ЦМР вычтены высоты лесов, зданий, сооружений, антропогенного рельефа. Для первичного анализа Фурье был использован плагин Fourier Transform для QGIS и ПО QGIS 3.32.3. Рассчитанный при помощи плагина спектральный образ рельефа экспортируется в виде csv-таблицы. Таблица содержит переменные: волновые числа (W), периоды (P), частоты (F), мощность спектра (SP) тренд (Tr) и остатки (R). Также плагин рассчитывает константы в уравнении зависимости логарифма спектра от логарифма частоты колебания:

$$\ln (Sp) = a + b * \ln \frac{1}{P} \quad (1)$$

где – а – первая константа; b – вторая константа; P – период.

Из второй константы b рассчитывается фрактальная размерность D по формуле [4]:

$$D = \frac{5-b}{2} - 1 \quad (2)$$

В ПО STATISTICA производится выделение из отклонений от линии регрессии спектра трендовой составляющей: 1) в новом столбце

рассчитывается натуральный логарифм от частоты $\ln(F)$; 2) при помощи инструмента General Regression выделяется полиномиальный тренд. Отклонения от полиномиального тренда подвергаются спектральному анализу (инструмент Time Series Analysis – Spectral (Fourier) Analysis).

На основе значимых пиков на полученной из анализа периодограмме определяются показатели масштаба форм рельефа разных иерархических уровней [4]. Далее в ArcMap 10.8 при помощи инструмента «Фокальная статистика», рельеф усредняется окнами сглаживания, размеры которых указываются, как определённые значимыми пиками периодограммы последнего анализа. В результате сглаживания рельефа получаются карты, отображающие геоморфологические формы каждого определённого иерархического уровня.

На рисунке 1 изображена периодограмма спектра рельефа Беларуси и его линии регрессии (слева), а также отклонения от линии регрессии спектра (справа). Линейная зависимость логарифма спектра от логарифма частоты указывает на фрактальность структуры рельефа.

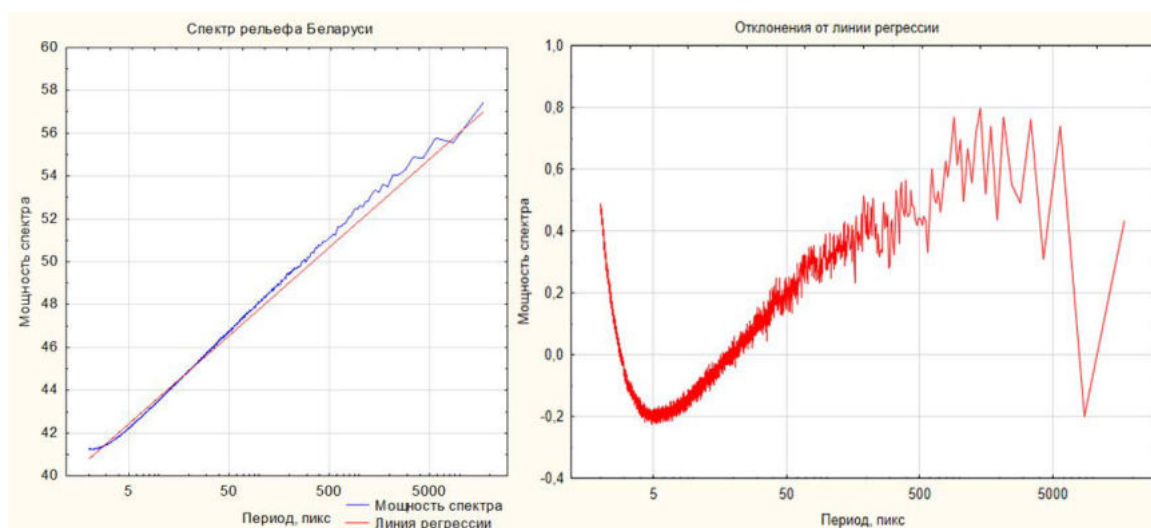


Рис. 1. Спектр рельефа Республики Беларусь (слева) и отклонения от спектра рельефа (справа)

Вторая константа (b) определена при помощи плагина Fourier Transform и равняется 1,789, а фрактальная размерность (D) – 1,605. Полученное значение фрактальной размерности соответствует «бурому шуму», который описывает рельеф, преимущественно определяемый эрозионной системой, близкой к равновесию [2].

Стоит обратить внимание на то, что значения периодов измеряются в пикселах (ячейках) исходной ЦМР. Таким образом, величина периодов (масштабов) форм рельефа на местности в метрах есть произведение значения периода в пикселах на разрешение ЦМР (50 м).

На рисунке 2 приведен график отклонения от линии регрессии спектра с полиномиальным трендом (слева) и периодограмма дисперсии отклонения от этого тренда (справа).

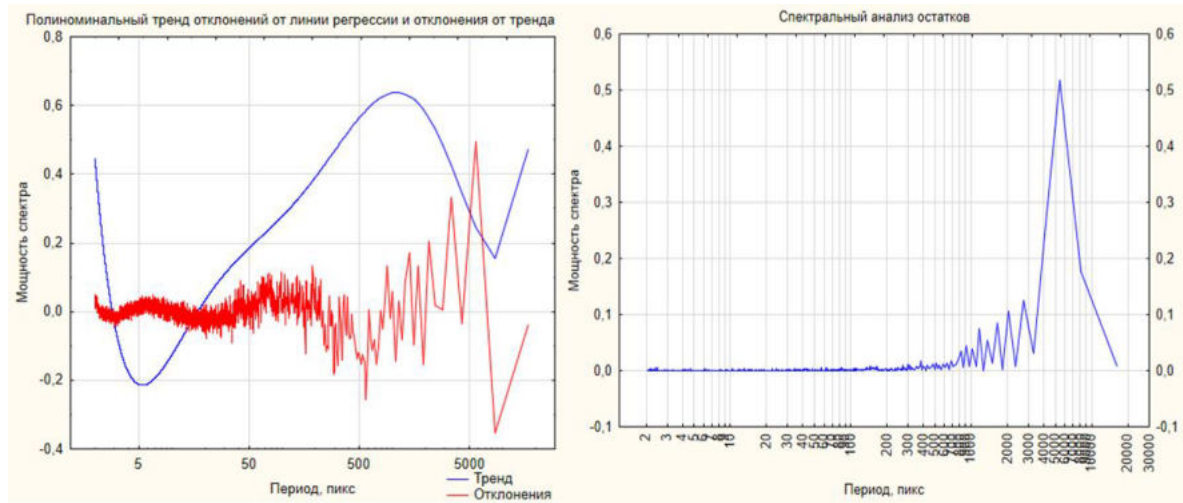


Рис. 2. Полиномиальный тренд и отклонения от него (слева) и дисперсия отклонений от полиномиального тренда (справа)

График отклонений от тренда имеет вид холмов, осложнённых вложенными пиками-зубцами – вид бурого шума, при этом разброс значений растёт с увеличением периода.

Точки экстремума полиномиального тренда (синяя линия на рисунке слева) соответствуют границам воздействия различных геоморфологических факторов. Предположительно, участок от 5,4 до 1080 ячеек описывает формирование рельефа под действием водотоков и эрозионных процессов, участок с периодом от 1080 ячеек и крупнее отражает зависимость рельефа от деятельности ледников, в первую очередь – сожского оледенения.

Осложнение формы («бугор» возле периода в 50 пикселей) графика тренда на этом участке может быть вызвано гляциоизостатическим поднятием после отступления поозерского ледника и последующим изменением базиса эрозии, деятельностью талых вод поозерского ледника, либо совокупностью этих факторов.

Высокочастотный «хвост» тренда (период менее 5,4 ячеек) всегда возникает при спектральном анализе рельефа и имеет неизученную на данный момент природу. Предположительно, это проявление шумов, вызванных погрешностями измерения или иными техническими свойствами моделей рельефа.

Периодограмма дисперсии отклонений от полиномиального тренда позволяет выделить статистические значимые пики, отражающие иерархические уровни организации рельефа. На основе этого графика для выделения иерархических уровней были отобраны следующие значения периода: 5460, 2730, 2048, 1638, 1170, 318, 168, 57, 18 пикселей (273000, 136500, 102400, 81900, 58500, 19050, 8250, 2850, 900 м соответственно). Которые в свою очередь можно разделить на низкочастотные (5460 пикселей), среднечастотные (2730–381) и высокочастотные (168–18) колебания (рис. 3).

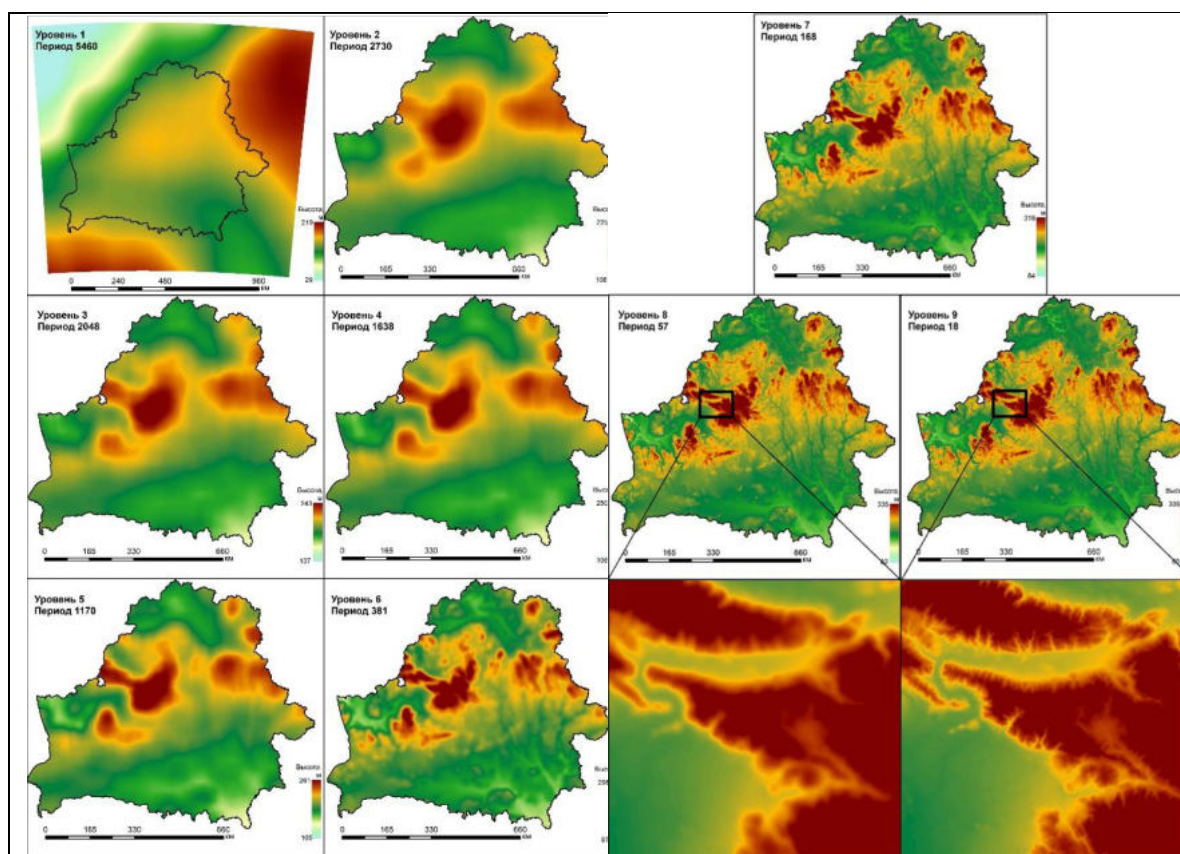


Рис. 3. Иерархические уровни рельефа Республики Беларусь

Рельеф на первом иерархическом уровне (период 5460 пикселей) отображает крупнейшие формы рельефа – возвышенности и низменности Русской равнины. Значения высот этой карты прямопропорциональны значениям глубин залегания кристаллического фундамента на этой территории. На втором иерархическом уровне (период 2730) выделяется Белорусская гряда и крупнейшие низменности – Полесская, Приднепровская, Полоцкая и Нёманская. На картах 3, 4 уровня (периоды 2048 и 1638) выделяются Витебская и Городокская возвышенности, а также Центральноберезинская и другие равнины. На

5 уровне (период 1170) становятся различимы небольшие по высоте и площади возвышенности и гряды краевых ледниковых формирований днепровского, сожского и поозерского оледенений, а также долины крупнейших рек.

Иерархические уровни 6, 7, 8 (периоды 318, 168, 57) отражают отдельные группы форм и формы мезорельефа: отдельные возвышенности и гряды, формы их склонов, а также долины рек, являющиеся притоками главных рек разных порядков (чем меньше период – тем меньше водотоки). На карте 9 иерархического уровня становятся различимы элементы овражно-балочной эрозионной сети.

Методика спектрального анализа рельефа позволила выделить 9 иерархических уровней организации рельефа, обусловленных действием исторических и современных геоморфологических факторов. Исходя из этого можно отметить перспективность применения спектрального анализа для изучения различных пространственных характеристик местности в различных масштабах. Полученные в результате этого или аналогичных исследований данные могут быть использованы в оптимизации работ по генерализации рельефа при производстве картографических произведений или моделировании различных природных процессов, лечь в основу создания иерархически соподчиненной, математически обоснованной иерархической типологии рельефа Беларуси, и как следствия – нового районирования.

В свою очередь такая схема районирования позволит детально выявить географическую локализацию, масштабы и причины проявления негативных геоморфологических процессов и предложить рекомендации по минимизации их негативного воздействия.

Библиографические ссылки

1. Пузаченко Ю. Г., Котлов И. П., Кренке А. Н. Теоретико-методологические основания исследования иерархии в географии и экологии // Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов. М. : Истоки, 2018.
2. Пузаченко Ю. Г., Дьяконов К. Н., Алещенко Г. М. География и мониторинг биоразнообразия. Разнообразие ландшафта и методы его измерения // Издательство Научного и учебно-методического центра, 2002. С. 76–101.
3. WorldDEM4Ortho Technical Product Specification [Электронный ресурс]. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2018-10-worlddem-now-entirely-edited-and-available-via-streaming> (дата обращения: 10.10.2024).
4. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях: Учеб. пособие для студ. вузов. М. : Издательский центр «Академия», 2004. С. 339–397.