

ТЕОРИЯ И СОЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ГЕОГРАФИИ

ДК 910.1

АНАЛИЗ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЛЬЕФА¹

© 2002 г. Ю. Г. Пузаченко*, И. А. Онуфреня**, Г. М. Алещенко***

*Институт проблем экологии и эволюции РАН

**Институт географии РАН

***Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 25.09.2001 г.

В работе рассматриваются методы двухмерного спектрального анализа рельефа, дополненные анализом остатков от уравнения регрессии “логарифм спектральной плотности – логарифм частоты”. Анализ остатков позволяет определить число потенциально действующих факторов и оценить линейные размеры иерархически соподчиненных структур. Полученные результаты показывают, что характер строения рельефа в районе исследования соответствует представлениям, вытекающим из теории нелинейной динамики. Отмечается, что знание правил организации пространственной структуры рельефа создает основу для выбора оптимального масштаба картографирования его различных уровней.

Феномен пространственно-иерархической организации ландшафта, открытый русской ландшафтной школой в 50-х годах [11], стал канонической основой всех ландшафтных исследований. При этом иерархия ландшафта рассматривалась в первую очередь как отражение иерархической организации рельефа и геологических структур.

В последние 10–15 лет вопросы пространственно-временной иерархии организации географических явлений (temporal spatial scale, multiscale) активно разрабатываются и обсуждаются в мировой экологической науке [14–17]. Морфометрический ряд разномасштабных форм рельефа и тектонических структур рассматривают Ж. Буркер, В.В. Пиотровский [4]. В начале 90-х годов Ю.Г. Симонов с соавторами [10] осуществляют работы по генетическому обоснованию этого феномена.

Д.А. Лилиенберг [2] на примере Каспийского региона демонстрирует факт иерархически соподчиненных пространственно-временных колебаний.

Попытка связи пространственных и временных масштабов иерархически соподчиненных форм рельефа предпринимается Бекером [13] (таб. 1). Автор вводит общее уравнение, связывающее характерное пространство и характерное время процессов:

$$S = aT^b,$$

где S – пространство (площадь), T – время.

Константа b , по мнению автора цитируемой статьи, равняется 1. Исходя из этого соотношение пространства–времени в результате простых пре-

образований выводится на основе теории линейных колебаний [5, 8] из соотношения массы и периода колебаний.

Хотя примеры, приводимые в табл. 1, не во всех случаях можно признать удачными, сама идея о иерархической организации, выражаемая в понятиях нано-, микро-, мезо- и макрорельефа достаточно прозрачна и может считаться общепринятой.

Обсуждая проблемы иерархической организации явлений природы, Ю.Г. Пузаченко [8] свел их возникновение к следующим возможным механизмам:

1. Иерархически соподчиненные части системы описываются процессами, частоты собственных колебаний которых различаются более чем в 2 раза; система равновесна, а ее части независимы, т.е. определяются различными факторами. Вывод этого механизма прямо вытекает из теории линейных колебаний, так как если частоты собственных колебаний близки, то в результате взаимодействия возникает резонанс и обе или одна из подсистем в конечном итоге разрушаются или преобразуются на основе контура отрицательной обратной связи в новую подсистему. В результате множества взаимодействий равновесными оказываются подсистемы, частоты собственных колебаний которых различаются более чем в 2 раза.

2. Если колебания и автоколебания системы нелинейны, то при определенных соотношениях поступления энергии и параметров системы и среды возникают устойчивые иерархически соподчиненные колебания с периодами, различающимися примерно в 2 раза или на величину, зависящую от длины волны, т.е. от иерархического

¹Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 99-05-65099.

Таблица 1. Иерархическая классификация и геоморфологические характеристики масштабов форм рельефа

Порядок	Примерная пространственная шкала, км ²	Характеристика элементарных территориальных единиц (в качестве примера)	Примерная временная шкала устойчивости, гг.
1	10 ⁷	Континенты, океанические бассейны	10 ⁸ –10 ⁹
2	10 ⁶	Физико-географические провинции, горные области, равнины	10 ⁸
3	10 ⁴	Среднемасштабные тектонические единицы (области отложений, горные массивы, куполообразные повышения)	10 ⁷ –10 ⁸
4	10 ²	Малые тектонические единицы (блоки, вулканы, области седиментации, отдельные горные системы)	10 ⁷
5	10–10 ²	Крупномасштабные формы эрозии и аккумуляции (дельты, большие равнины, пьедемонты)	10 ⁶
6	10 ⁻¹ –10	Среднемасштабные формы эрозии/аккумуляции или ландшафты (поймы, древние аллювиальные системы, морены, малые долины и коньены)	10 ⁵ –10 ⁶
7	10 ⁻²	Мелкомасштабные формы эрозии/аккумуляции или ландшафты (уступы, террасы, песчаные дюны)	10 ⁴ –10 ⁵
8	10 ⁻⁴	Формы образованные крупномасштабными геоморфологическими процессами и ландшафты (склоны холмов, части русловых потоков)	10 ³
9	10 ⁻⁶	Среднемасштабные геоморфологические процессы (водоемы, овраги, речные бары, дефляционные формы)	10 ²
10	10 ⁻⁸	Микромасштабные геоморфологические процессы (флювиальные, эоловые и гляциальные структуры)	–

уровня. Внешне иерархическая структура, порождаемая этим механизмом, может быть неотличима от структуры, возникающей под действием первого, однако в отличие от него она обусловлена действием одного, а не нескольких независимых факторов.

3. Никакой объект не может принимать информацию в неограниченной полосе частот и неограниченном числе независимых каналов. С увеличением полосы частот или числа каналов почти экспоненциально растут ошибки в преобразовании информации, и система разрушается или специализируется. При множестве взаимодействий между подсистемами неизбежно возникает иерархия, при которой подсистемы нижнего уровня специализированы под отдельные полосы частот или отдельные каналы (внешние факторы). Системы же более высокого иерархического уровня ориентированы на получение от элементов нижнего уровня селективно отобранной информации, ее дальнейшего перераспределения по линии обратной связи на подчиненные подсистемы, обеспечивая тем самым их взаимную координацию и функционирование как единого целого.

4. Любая классификация на множестве частично независимых переменных порождает иерархию. Отображение явлений природы через дискретные образы можно рассматривать как способ упорядочения информации и как систему

кодирования. В принципе, через образы представимо как дискретное, так и непрерывное множество.

Все четыре механизма возникновения иерархии порождают *самоподобные фрактальные структуры* с соответствующей нецелочисленной размерностью. Обоснование приложимости идей теории фрактальных множеств к географии рассматривается одним из авторов статьи ранее [7]. В данном случае важно констатировать, что *иерархические структуры, сохраняющие на некотором интервале частот единую фрактальную размерность, могут быть результатом действия одного нелинейного механизма колебаний, иначе говоря, одного фактора.*

Реальная иерархическая структура обычно является результатом совместного действия нескольких факторов. Пространственно-временные колебания, вызываемые различными факторами, могут накладываться друг на друга, усиливая или ослабляя амплитуды на соответствующих частотах. Если факторов очень много, то пространственно-временные колебания становятся чисто хаотическими. С другой стороны, если на различных интервалах пространственно-временных частот фрактальные размерности различаются, то можно полагать, что в этих интервалах действуют заведомо физически различные факторы.

Исследование реальных пространственных структур имеет конечной целью объяснение механизмов их возникновения и воспроизведение их пространственно-временной динамики. Для достижения этой цели необходимо решить следующие крупные задачи:

1. Количественно описать правило, определяющее строение изучаемой структуры и его основные свойства (параметры).
2. Определить число факторов, порождающих данную структуру и обусловленные ими частные подструктуры.
3. Выявить и описать физические механизмы, определяющие наблюдаемые частные структуры.
4. Построить модели, описывающие пространственно-временные колебания.

В настоящем сообщении рассматриваются пути решения первых двух задач для двухмерной поверхности и развиваются подходы, продемонстрированные ранее [6] при анализе структуры рельефа трансекта.

Материал и методические основания анализа.

Исходным материалом является электронная топографическая карта Калужской области масштаба 1 : 200 000, оцифрованная ГОСГИСЦЕНТРОМ, с географическими координатами: левый верхний угол 33.99° в.д., 55.34° с.ш., правый нижний 37.00° в.д., 53.33° с.ш., охватывающая площадь 44 812 км². Интерес к этой территории определяется программой проектирования системы охраняемых территорий (эконет), финансируемой Всемирным Фондом дикой природы (WWF).

Пространственная структура рельефа исследуется на основе двухмерного спектрального анализа, подробно рассмотренного на примере двухмерного анализа аэрофотоснимка [9]. В рамках анализа последовательно решаются следующие частные задачи: 1) построение на основе топографической карты поверхности по регулярной сетке (Программа Surfer 7. метод триангуляции); 2) оценка двухмерного спектра (Программа Surfer 7); 3) преобразование двухмерного спектра в линейную форму по левому и правому секторам движения при оценке автокорреляционной функции; 4) оценка параметров регрессии "логарифм спектра – логарифм частоты" и определение на этой основе фрактальной размерности (D). $\log(\text{Спектральная плотность}) = \alpha - \beta \log(\text{частота})$, $D = (7 - \beta)/2$ Авторский пакет программ Fracdim); 5) выделение интервалов частот с возможно различающейся фрактальной размерностью, проверка гипотезы об их различии и оценка локальных фрактальных размерностей; 6) выделение остатков от линии регрессии и удаление колебаний, возникающих из-за дискретного представления высот рельефа (Пакет программ Statistica); 7) анализ спек-

тра остатков и оценка возможного числа факторов, порождающих пространственную структуру рельефа; 8) построение общей статистической модели иерархической организации рельефа.

Результаты анализа

Предварительно вся оцифровка была проверена и исключены все имевшиеся ошибки идентификации горизонталей. Затем точки оцифровки были сгущены до средней нагрузки 20 точек на 1.5 км, со средним расстоянием между точками 75 м. Сгущение точек осуществлялось для более корректного построения регулярной сетки. Грид ("грид" – регулярное поле высотных отметок) строился методом триангуляции. Его реальное разрешение во многом определялось расстоянием между горизонталями и самим характером рельефа.

Рассчитать реальное разрешение теоретически весьма затруднительно, хотя в первом приближении, основываясь на теореме отсчета (теорема Котельникова–Вудворда), можно утверждать, что разрешение одного пикселя грида должно быть равно половине среднего расстояния между горизонталями.

Начальное изображение рельефа на регулярной сетке (грид) было построено с разрешением 200 м. На рис. 1 представлен общий вид рельефа изучаемой территории.

Анализ двухмерного спектра рельефа выявил существование целой серии хорошо выраженных иерархических структур с сильной пространственной асимметрией (рис. 2) (светлый тон – высокие значения спектральной плотности, черный – низкие). По осям X , Y отложены значения волновых чисел в интервале от 200 (при минимальной длине волны в один метр) до 99 600 волн по X и 111 100 волн по Y . Волновое число k связано с периодом (P) как

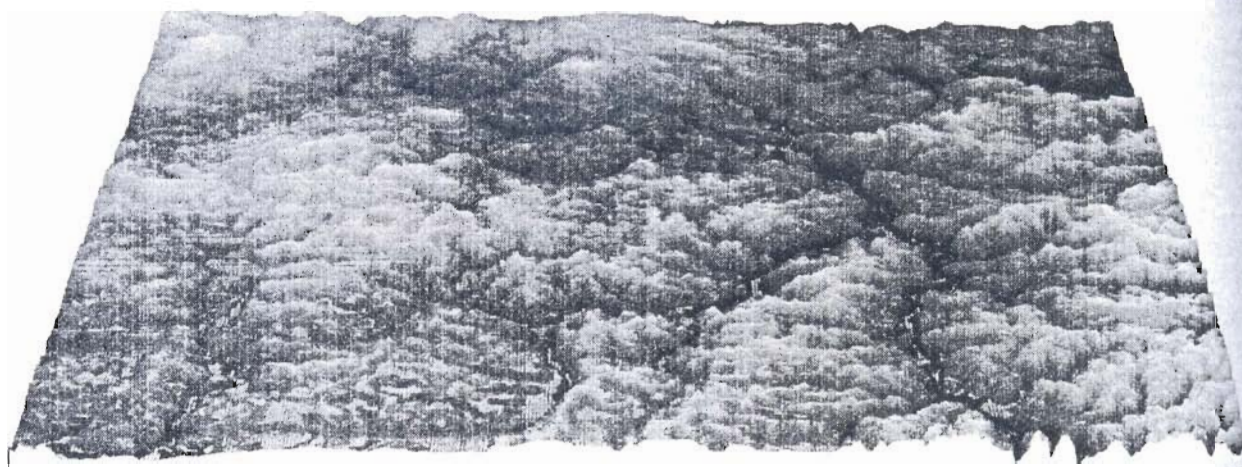
$$k = L/P,$$

где L – максимальная длина пространственного ряда, и с частотой f как

$$k = Lf,$$

откуда $f = 1/P$.

Двухмерный спектр демонстрирует существование нескольких иерархических уровней в организации рельефа, выражающиеся через его изолированные светлые участки. По направлению северо-запад и запад пространственные структуры различного иерархического уровня выражены существенно лучше (более частое чередование светлых и темных тонов), чем по направлению на северо-восток, что указывает на пространственную асимметрию форм рельефа.



р. Ока

Рис. 1. Вид рельефа Калужской области при взгляде с юга.

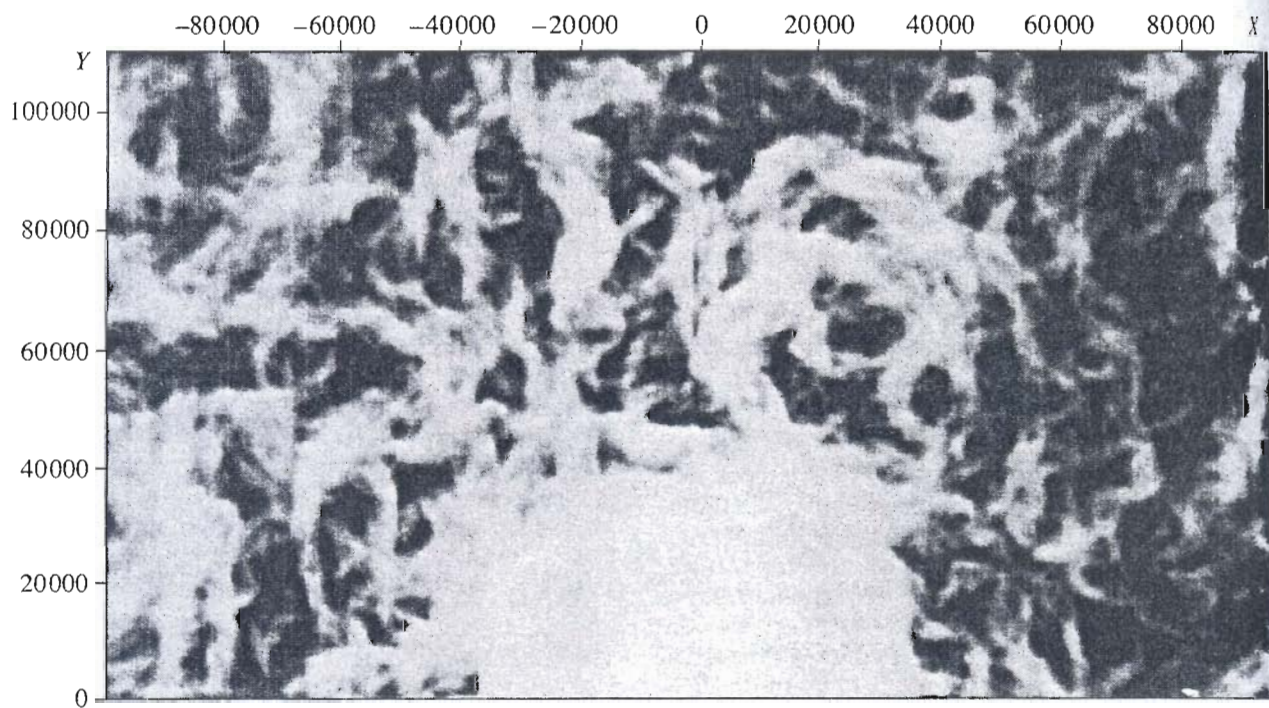


Рис. 2. Общий вид двумерного спектра рельефа. X , Y – волновые числа при исходной единице измерения 200 м в одном пикселе. Светлые тона – высокие значения логарифма спектральной плотности.

Последующий анализ проводится по обобщенному двумерному спектру, отражающему средние значения спектральной плотности для одних и тех же частот по осям X и Y при их суммировании по левой и правой половине двумерного спектра.

На рис. 3 приведена оценка спектра для центра территории при квадрате со стороной 100 км. В табл. 2 приведены параметры уравнения регрессии “логарифм спектральной плотности –

логарифм частоты”. Полученная оценка фрактальной размерности для изображения $D = 2.0$ соответствует представлению о черном шуме.

На рис. 4 показаны отклонения от линии регрессии, с исключением наиболее высокочастотных колебаний с периодом в два пикселя. Появление этого периода есть результат квантованного отображения высот в “гриде” при заданном разрешении. Из рисунка следует, что линии регрессии для интервала с периодом меньше 6 пикселей

больше 6 не совпадают. Следовательно, система не самоподобна, и ее высокочастотная часть скорее всего имеет иную факторную природу, чем низкочастотная. Вероятно, что в данном случае параметры линии регрессии в высокочастотной части определяются искажениями при построении "грида" с завышенным пространственным разрешением, не обеспеченным достаточной информацией о строении рельефа, содержащейся в горизонталях и высотных отметках топографической карты. Соотношение линий регрессии для этих двух интервалов показано на рис. 5, а в табл. 2 приведены их параметры.

Из табл. 2 видно, что тангенсы углов наклона (β) линейных регрессий для двух частотных подобластей 200–1200 м и 1200–50 000 м достоверно отличны. Вместе с тем параметры регрессий по левому и правому направлению неотличимы. Отсюда следует, что скорее всего разные подобласти колебаний действительно описываются принципиально различными факторами; при этом фрактальная размерность в высокочастотной области – 1.86, а в низкочастотной – 2.16. Фрактальная размерность меньше 2 для плоскости указывает на исключительно высокую локальную контрастность значений высот (четко выраженные ступени), что индицирует прямое отображение колебания горизонталей в самом гриде. Фрактальная размерность в низкочастотной области при гриде с разрешением 1.2 км на местности весьма типична для равнинных территорий и близка к черному шуму. Для того чтобы воспро-

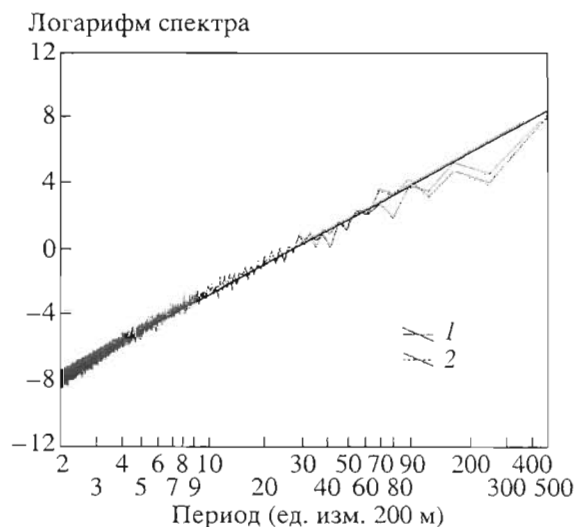


Рис. 3. Спектр рельефа для разрешения 200 м в пикселе. Движение скользящего квадрата 1 – слева направо, 2 – справа налево.

извести структуру рельефа на уровне 1.2 км, необходимо построить грид с разрешением 600 м в пикселе (теорема отсчета Шеннона [12] – любая непрерывная функция воспроизводима не менее чем двумя отсчетами на минимальный период колебаний). При таком разрешении, скорее всего, будут исключены искажения, связанные с неполнотой исходной информации и воспроизведены все реально существующие формы рельефа.

Таблица 2. Оценки фрактальной размерности рельефа на основе уравнения регрессии "логарифм спектр ($\lg Sp$) – логарифм частоты ($1/P$)"

Интервал, м	Сектор	R^2	β	Ошибка β	Фрактальная размерность
200–50 000	левый	0.97	2.9393	0.0309	2.0303
	правый	0.97	2.9447	0.0298	2.0276
200–1200	левый	0.84	3.2843	0.1101	1.8578
	правый	0.85	3.2853	0.1054	1.8574
1200–50 000	левый	0.96	2.7149	0.0548	2.1426
	правый	0.97	2.6720	0.0487	2.164
1200–192 000	левый	0.96	2.6788	0.0395	2.1606
	правый	0.96	2.6954	0.0394	2.1523
1200–4800	левый	0.89	2.8857	0.0896	2.0572
	правый	0.90	2.9693	0.0887	2.0154
4800–9600	левый	0.76	2.9455	0.2719	2.0273
	правый	0.78	2.9836	0.2541	2.0082
1200–9600	левый	0.78	2.9836	0.2541	2.0082
	правый	0.88	2.9626	0.0966	2.0187
9600–192 000	левый	0.93	2.4374	0.1070	2.2813
	правый	0.93	2.4672	0.1076	2.2664

Примечание. $\lg Sp = \alpha - \beta \log 1/P$. Фрактальная размерность – $D = (7 - \beta)/2$.

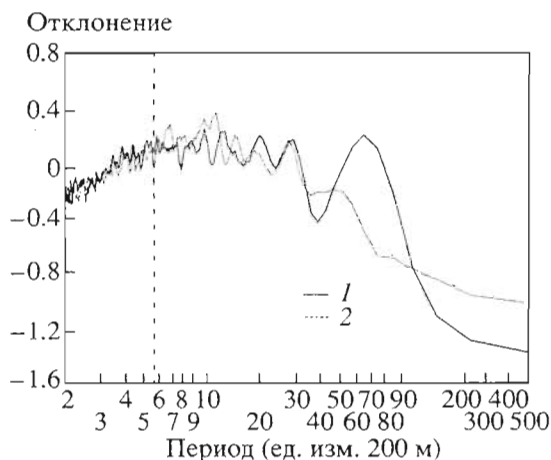


Рис. 4. Отоклонения от линии регрессии "логарифм спектральной плотности-период". Движение скользящего квадрата: 1 – слева направо, 2 – справа налево.

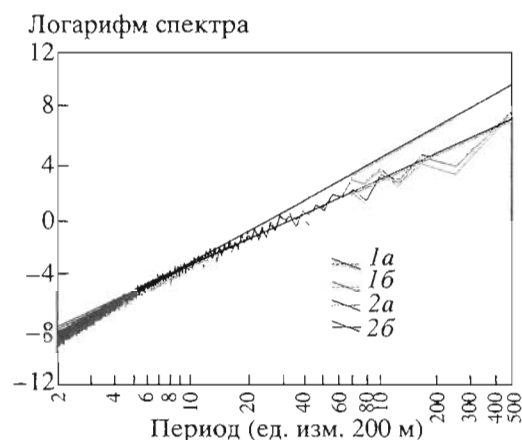


Рис. 5. Оценка спектра отдельно для высокой и низкочастотной областей. 1 – левый спектр, 2 – правый; а – область с периодами колебаний от 400 до 1200 м, б – с периодами колебаний более 1200 м.

На рис. 6 показано отображение рельефа через лапласиан при разрешении 600 м в пикселе, который в целом отображает структуру эрозионной сети. Очевидно, что положение конкретных горизонталей не вносит заметных искажений.

Не рассматривая дополнительные методы оценки качества грида, примем, что адекватное отображение рельефа соответствует полученному разрешению в 1.2 км в пикселе.

По отклонениям от линии регрессии в интервале от 1200 до 192 000 (рис. 7) визуально выделяются три подобласти с различной фрактальной размерностью: 1200–4800, 4800–9600 и 9600–192 000 м. Оценки фрактальных размерностей для этих подобластей показывают, что поверхность в интервале 1200–9600 м имеет общую размерность 2.01, а размерность в интервале 9600–192 000 м достоверно выше – в среднем 2.27 (см. табл. 2). Параметры уравнений регрессии в интервалах 1200–4800 и 4800–9600 м различаются недостоверно. Таким образом, можно полагать, что строение рельефа определяется по крайней мере двумя различными физическими факторами.

Имея ввиду существующие представления о генезисе рельефа территории, можно полагать, что до линейных размеров примерно в 10 км форма рельефа обусловлена моренными отложениями (фрактальная размерность – 2.01), а в меньшем масштабе – строением геологического фундамента (2.27). При этом четвертичные отложения, сглаживая исходную поверхность, определяют формы, соответствующие "черному шуму", а структура фундамента с большей фрактальной размерностью, возможно, отражает его дочетвертичное структурно-эрозионное строение (типичная размерность эрозионного рельефа – 2.5).

На рис. 8а приведены полиномиально сглаженные отклонения от линии регрессии как

функция периода, а на рис. 8б как функция частоты. Характер колебания остатков от спектра по частоте указывает на их неслучайность, что легко проверяется через автокорреляцию.

Физически это означает, что в рельефе существуют волны, частоты которых связаны как

$$w_n = w_0 n,$$

где n – целое число, соответствующее номеру волны или иерархического уровня. Иначе говоря, имеются уровни с периодами $1/w_0$, $1/2w_0$, $1/3w_0$ и т.д. То есть волны в рельефе есть результат действия фактора, порождающего каскад самоподобных структур, период которых тем больше, чем меньше номер волны и выше иерархический уровень ($n_1 = 1$). Такой вид спектра типичен для многих нелинейных автоколебательных процессов [1, 3].

Число независимых факторов и соответствующую им основную собственную частоту колебаний w_0 можно оценить на основе спектрального анализа остатков от сглаженного спектра рельефа (рис. 9). Из рисунка следует, что формирование рельефа происходит в результате независимого действия трех-четырёх факторов, каждый из которых порождает самоподобные структуры. Первый фактор определяет симметричные в пространстве структуры рельефа с частотой $w_0 = 0.0125$, и порождает периоды $P_1 = 80$ пикселей или 96 км, $P_2 = 40$, $P_3 = 26.7$, $P_4 = 20$, $P_5 = 16$, $P_6 = 13.3$, $P_7 = 11.4$, $P_8 = 10$, $P_9 = 8.8$, $P_{10} = 8$, $P_{11} = 7.3$, $P_{12} = 6.7$, $P_{13} = 6.15$, $P_{14} = 5.71$, $P_{15} = 5.33$, $P_{16} = 5$ и т.д. до частоты Найквиста (0.5), соответствующей 40-му иерархическому уровню ($P_{40} = 2$ пикселя, 1.2 км).

Второй фактор, отражающий также симметричные структуры, имеет $w_0 = 0.0937$ с базовым

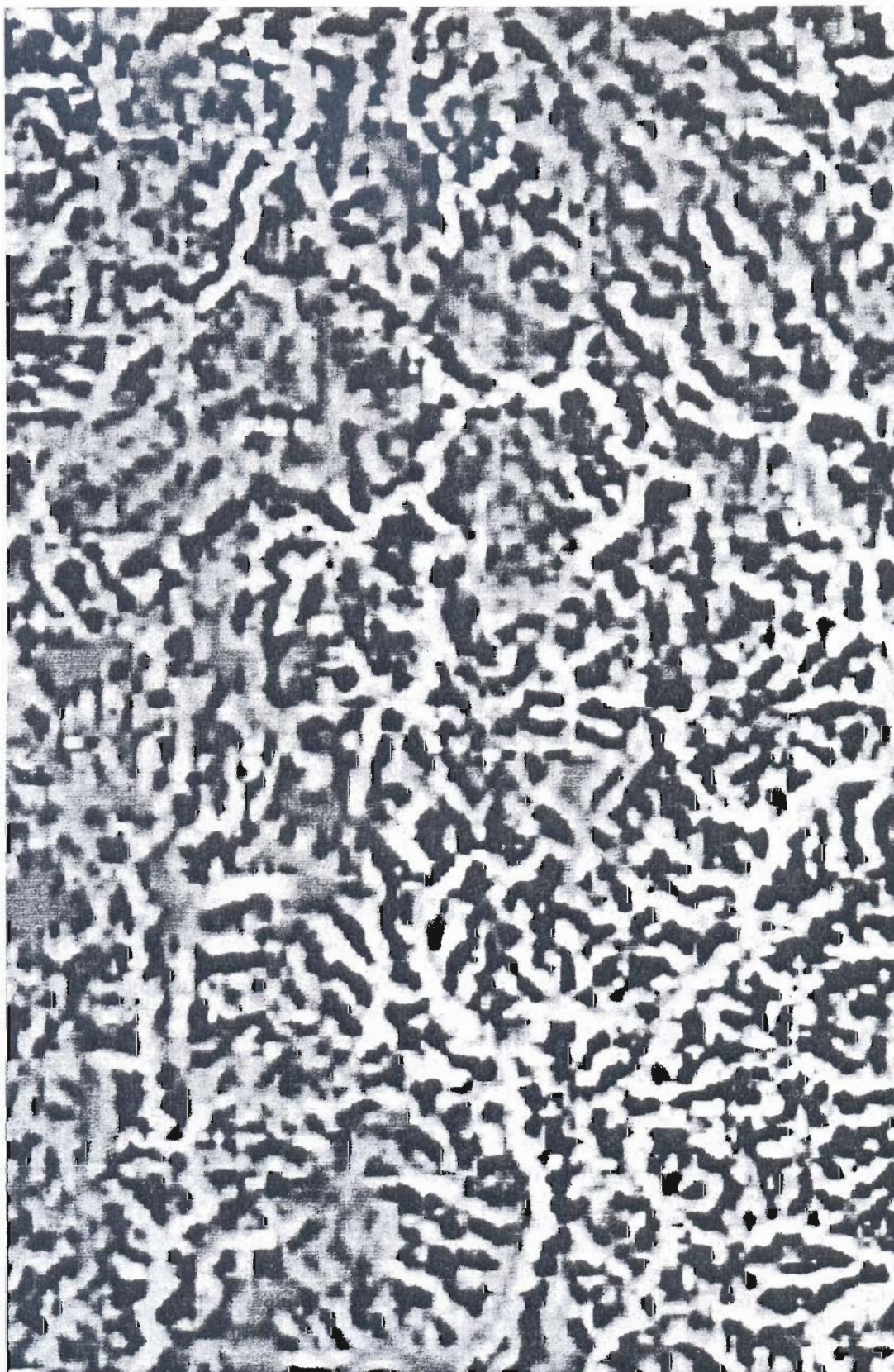


Рис. 6. Отображение рельефа через лапласиан при разрешении 600 м в пикселе. Светлый тон – вогнутые формы рельефа.

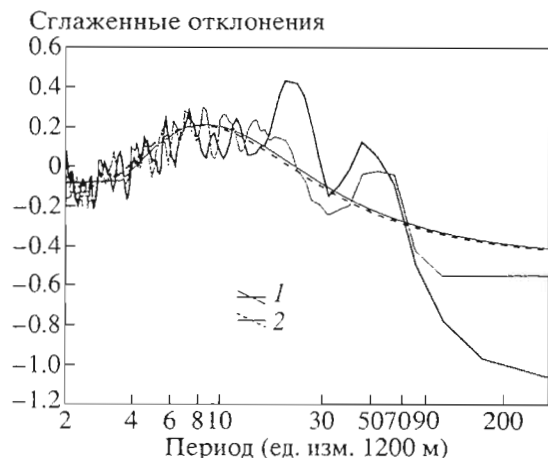


Рис. 7. Отклонения от линии регрессии "логарифм спектральной плотности-логарифм частоты" при разрешении 1200 м в пикселе.

Движение скользящего квадрата: 1 – слева направо, 2 – справа налево.

периодом $P_1 = 10.7$ и $P_2 = 5.35$, $P_3 = 3.55$, $P_4 = 2.67$, $P_5 = 2.1$.

Третий фактор с $w_0 = 0.135$ порождает периоды $P_1 = 7.4$, $P_2 = 3.7$, $P_3 = 2.5$.

Четвертый фактор с $w_0 = 0.0375$ определяет существование структур рельефа только юго-восточной ориентации с периодами $P_1 = 26.7$, $P_2 = 13.3$, $P_3 = 8.9$, $P_4 = 6.67$, $P_5 = 5.34$, $P_6 = 4.45$, $P_7 = 3.81$ и т.д.

Волны с близкими периодами могут усиливать друг друга, в результате чего наиболее выраженные структуры можно ожидать при периоде в 26 пикселей (31.2 км), 10 пикселей, 7–8 пикселей и пять пикселей. Из рис. 8а следует, что близкие к ним иерархические структуры действительно выделяются в исходном спектре. Вполне понятно, что при такой структуре высока вероятность хорошей выраженности микроструктур с периодами в 5–3 пикселя, так как в этой области происходит резонансное наложение волн, порождаемых большинством независимых факторов.

Таким образом, в результате наложения действия всех факторов наиболее выраженными оказываются структуры с линейными размерами в 3 пикселя (3.6 км), 4–5 пикселя (4.8 км – 6 км), 7–8 пикселей (8.4–9.6 км), 10–12 пикселей (12–14.4 км), 23–26 пикселя (27.6–31.2 км) и 46–64 пикселя (55–77 км). Некоторые несовпадения между расчетными значениями длины волн и значениями, выделяемыми непосредственно по спектру, объясняются эффектом небольшого сглаживания при построении спектра. В целом же анализ показывает, что исследуемая поверхность есть результат взаимодействия трех-четырех независимых факторов, порождающих устойчивую иерархию в ее организации. Выяснение природы

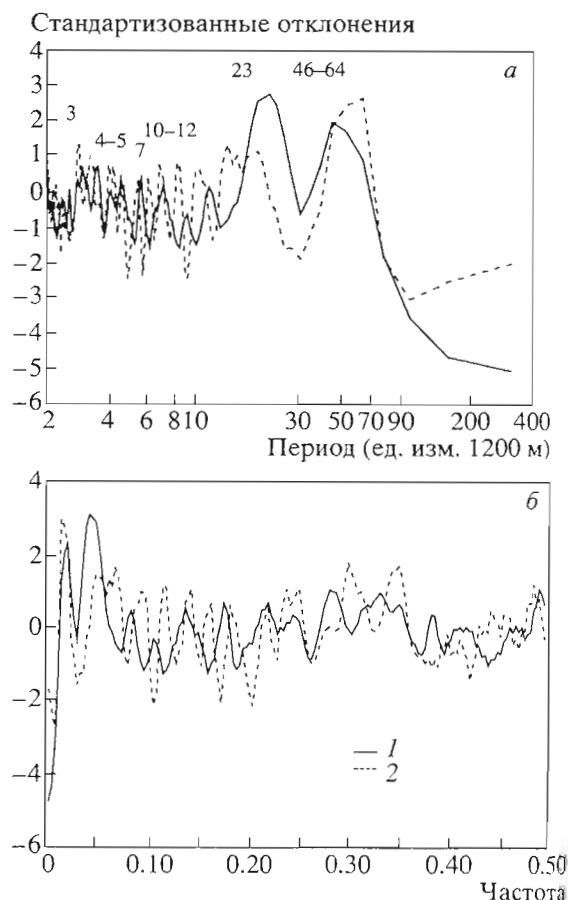


Рис. 8. Остатки от полиномиального сглаживания относительно а – периода колебания; б – частоты колебания. Движение скользящего квадрата: 1 – слева направо, 2 – справа налево.

этих факторов требует отдельного рассмотрения и не входит в задачи данной статьи.

Выделяя иерархические уровни организации рельефа по точкам перегиба отклонений от линии регрессии (рис. 8а), можно с достаточной надежностью определить число иерархических уровней в рассматриваемом интервале масштабов.

Проведенный анализ показывает, что структура рассматриваемого рельефа несколько асимметрична. По направлению северо-запад выделяется 14 иерархических уровней, а по направлению северо-восток – 13 (рис. 10), причем асимметричность особенно характерна для наиболее крупных форм рельефа. Это возможно, если форма структур в плане близка к прямоугольникам, имеющим в целом северо-восточную ориентацию.

Ставя в соответствие каждому иерархическому уровню его линейные размеры, можно описать общее правило формирования иерархической структуры, интегрирующее взаимодействие всех рельефообразующих факторов.

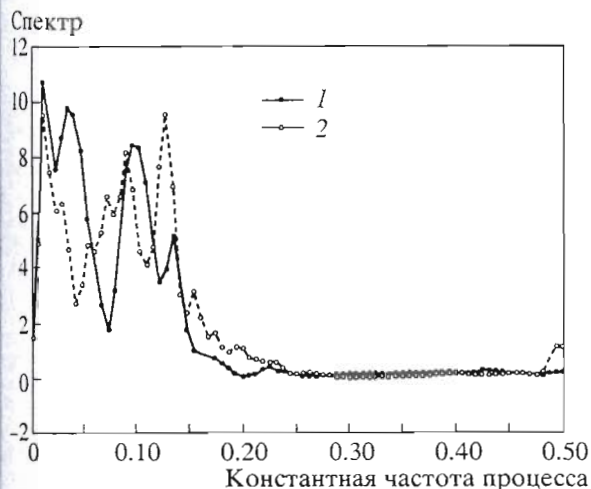


Рис. 9. Оценка константных частот (w_0) и числа независимых автоколебательных процессов, определяющих пространственную структуру рельефа. 1 – движение скользящего квадрата слева направо, 2 – справа налево. Пики спектра определяют значения частоты.

Уравнения, описывающие связь линейных размеров с иерархическим уровнем, имеют вид, характерный для многих типов нелинейных колебаний [1]:

Северо-западное направление –
линейные размеры (м) = $1200 / (0.392 - 0.0285 \text{ номер уровня})$,

Северо-восточное направление –
линейные размеры (м) = $1200 / (0.449 - 0.0309 \text{ номер уровня})$.

Все параметры зависимостей, стоящие в знаменателе, различаются вполне достоверно.

Обсуждение результатов. Применение формальных методов анализа поверхности показывает, что рельеф организован как система вложенных друг в друга иерархических уровней и в его основе скорее всего лежат механизмы, порождающие нелинейные автоколебания, природа которых объяснима с позиции представлений теории нелинейных динамических систем.

Иерархия описывается вполне определенными параметрами. Вероятно, что она обусловлена суммой принципиально различными генетическими факторами, порождающими качественно различные структуры. Одна из них обуславливает высокочастотную иерархическую организацию с периодами структур меньше 9.6 км, а другая весь составленный спектр структур с большими периодами. С другой стороны, иерархическая структура есть результат наложения действия по крайней мере трех независимых факторов, существенно различающихся по мощности воздействия. Самые низкочастотные колебания порождает

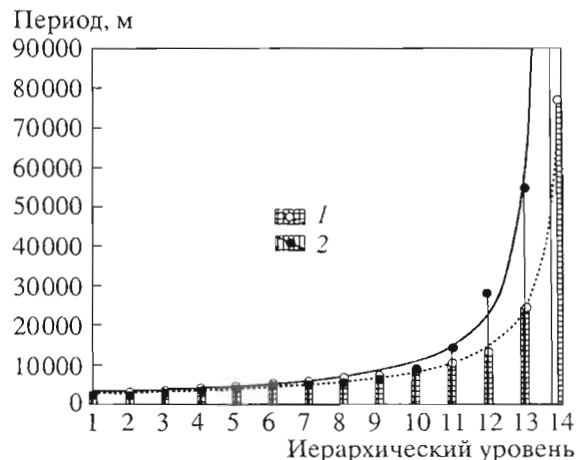


Рис. 10. Связь линейных размеров с номером иерархического уровня организации рельефа. 1 – левый сектор, 2 – правый сектор.

первый фактор, который имеет наибольшую мощность воздействия и вызывает почти хаотический каскад вложенных структур. Второй, третий и четвертый факторы обладают существенно меньшими мощностями; кроме того, четвертый фактор в отличие от первых трех имеет одностороннее воздействие.

Идентифицировать природу этих факторов на основе только спектрального анализа невозможно. Для этого необходимо выделить на местности структуры, в наибольшей степени зависящие от каждого фактора, и исследовать их внутреннюю организацию, включая вертикальную мощность, характер границ, плотность, внутреннюю структуру и т.п., прямыми геофизическими методами. При этом должны проверяться все существующие гипотезы, связанные с представлениями о деформации твердых тел при действиях сжатия и растяжения с различными векторами приложения действующей силы.

Если же речь идет о структурах, связанных с оледенением, то должны рассматриваться гипотезы о возможных механизмах движения льда по исходно неслучайно организованной поверхности, отражением которого являются наблюдаемые формы рельефа, связанные с вытаявшими из его тела отложениями.

Таким образом, задачи выделения характерных структур решаются в рамках анализа самого рельефа. Решение же задач, связанных с объяснением наблюдаемого, требует привлечения дополнительной независимой информации.

С другой стороны, решая задачи, не требующие знания тонкостей генезиса, можно непосредственно использовать полученные количественные оценки параметров рельефа. Так, например,

установленная иерархия дает возможность выбрать оптимальные масштабы при построении ландшафтных карт, карт оценок разнообразия и классификации форм рельефа. Оптимальность выбора сводится к тому, что при масштабе карты, согласованном с наиболее вероятными пространственными линейными размерами объектов картографирования, обеспечивается минимальное искажение их форм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ланда П.С. Нелинейные колебания. М.: Наука, 1991. 495 с.
2. Лилиенберг Д.А. Новые подходы к оценке современной эндодинамике Каспийского региона и вопросы ее мониторинга // Изв. РАН, сер. геогр., 1994. № 2. С. 16–37.
3. Нейрмак Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987. 423 с.
4. Проблемы теоретической геоморфологии. М.: Изд-во МГУ, 1999. 511 с.
5. Пузаченко Ю.Г. Пространственно-временная иерархия геосистем с позиции теории колебаний // Вопросы географии. М.: Наука, 1986. С. 96–111.
6. Пузаченко Ю.Г. Измерение сложности ландшафта // Изв. РАН, Сер. геогр. 1995. № 4. С. 38–50.
7. Пузаченко Ю.Г. Приложения теории фракталов к изучению структуры ландшафта // Изв. РАН, сер. геогр., 1997. № 2. С. 24–50.
8. Пузаченко Ю.Г. Методологические основы географического прогноза и охраны среды. М.: Изд-во УРАО, 1998. 212 с.
9. Пузаченко Ю.Г., Алещенко Г.М., Молчанов Г.С. Многомерный анализ аэрофотоснимков при изучении структуры ландшафта // Изв. РАН, сер. геогр. 1999. № 2. С. 80–91.
10. Симонов Ю.Г., Ананьев Г.С., Аристархова Л.Б. Процессы эндогенного рельефообразования // Динамическая геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1992. Глава 2. С. 24–76.
11. Солнцев Н.А. О морфологии природного географического ландшафта // Вопросы географии. М.: Географгиз, 1949. Сб. 16. С. 16–86.
12. Шеннон К. Связь при наличии шума // Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. С. 433–460.
13. Baker Victor R. Introduction: Regional Landforms Analysis // Nicholas M. Short, Sr. and Robert W. Blair. Geomorphology from Space. NASA. 1986. <http://geomorpho.amu.edu.pl/wpk/geos/>
14. Delkourt H.R., Delkourt P.A., Webb T. Dynamic plant ecology: the spectrum of vegetation change in space and time // Quaternary Science Reviews, 1983. № 1. P. 153–175.
15. Forman Richard T.T. Land Mosaics Cambridge Univ. Press, 1997. 632 p.
16. O'Neill R.V. Transmutations across hierarchical levels: System analysis of Ecosystems / International Cooperative Pairland / MD, 1979. P. 59–78.
17. Shugart Herman H. Terrestrial Ecosystems in Changing Environments. Cambridge Univ. Press, 1998. 538 p.

Analyses of Hierarchic Organization of the Relief

Yu. G. Puzachenko*, I. A. Onufrenya**, G. M. Aleshenko***

*Institute of Ecology and Evolution, RAS

**Institute of Geography, RAS

***Moscow State University

Methods of two-measured spectral analyses of the relief, added by analyses of the balance of regression equation "logarithm of spectral density – logarithm of frequency". Analyses of balance permits to determine the amount of potential functioning factors and evaluate the linen dimensions of hierarchic co-ordinates structured. Received results show that character of the relief structure in the examined region corresponds to the ideas, based on the theory of nonlinear dynamic. It is stressed that knowledge of spatial organization rules of relief structure creates the base for optimal scale of the mapping of their different levels.