

Глава 3. Организация рельефа.

3.1. Иерархическая организация рельефа.

Феномен пространственной иерархической организации ландшафта, открытый русской ландшафтной школой в 50 –ых годах 20 века, стал канонической основой всех ландшафтных исследований. При этом иерархия ландшафта рассматривалась в первую очередь как отражение иерархической организации рельефа и геологических структур.

Обсуждая проблемы иерархической организации явлений природы, Ю.Г. Пузаченко (1998) свел их возникновение к следующим возможным механизмам:

1. Иерархически соподчиненные части системы описываются процессами, частоты собственных колебаний которых различаются более чем в два раза. Система равновесна, а ее части независимы;
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 два раза или на величину, зависящую от длины волны, то есть от иерархического уровня. При этом иерархическая структура возникает в результате действия одного фактора;
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;
4. Любая классификация на множестве частично независимых переменных порождает иерархию.

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 практически хаотическими.

Это свойство рельефа послужило одной из важных семантических основ фрактальной геометрии природы. На многих примерах было показано, что при увеличении масштаба площадь острова стремиться к пределу, а его периметр к бесконечности. Очевидно, что

периметр острова есть нулевая горизонталь и то, что справедливо для нулевой горизонтали справедливо и для любой другой. Так же было показано, что между порядком водотока и его длиной существует нелинейная зависимость, описываемая показательной функцией. Наконец, были разработаны алгоритмы, позволяющие по одному параметру – величине фрактальной размерности—построить рельеф с высокой точностью имитирующей реальность (Мандельброт, 2002). Если рельеф строго фрактален, то он самоподобен и при любом масштабе отображается подобно в трехмерной модели. Это означает, что в принципе для отображения иерархических уровней можно брать любые масштабы, кратные целому числу.

Вместе с тем было показано (Пузаченко и др., 2002а,б), что рельеф не является строго фрактальным. При детальном анализе можно выделить квазигармонические колебания, маркирующие наиболее вероятные иерархические уровни организации в форме волн на поверхности земли. С другой стороны, рельеф самоподобен и имеет общую фрактальную размерность в том случае, если механизмы его формирования в разных масштабах – тождественны. Последнее далеко не обязательно. Установить, является ли рельеф конкретной территории строго самоподобным можно на основе двухмерного спектрального анализа (Turcotte, 1997) . Таким образом, для любого иерархического уровня должна существовать элементарная форма рельефа, отображаемая квадратом со стороной 3-5 элементарных точек. Можно считать доказанным, что поверхность земли скорее соответствует модели непрерывного, нигде не дифференцируемого множества с нецелочисленной размерностью, то есть описывается моделью фрактальной геометрии (Васильев, 1992; Пузаченко, 1997). Модель фрактальной поверхности - трансцендентная кривая, уравнение которой не является алгебраическим в прямоугольной системе декартовых координат. В отличие от алгебраических, такие кривые могут иметь бесконечно много точек перегиба и пересечений с прямой. У них могут существовать точки особой природы, которых нет у алгебраических кривых: точки прекращения, точки излома, асимметрические точки, к которым непрерывно приближается ветвь кривой. Эти кривые имеют нецелочисленную размерность и порождают фрактальные множества. Физической основой таких структур являются нелинейные процессы, параметры которых зависят от собственного состояния. Скорее всего, каждый природный процесс порождает собственную иерархическую структуру, определяемую действием конкретного фактора. Рельеф, как и любое явление природы, многофакторен, а число факторов, ответственных за его структуру и эволюцию, не может быть очень большим (Пузаченко и др., 2002).

Рельеф (форма поверхности) всегда рассматривается как один из ведущих факторов, в существенной степени, прямо или косвенно определяющий ход природных и социальных

процессов. С другой стороны, рельеф является результатом взаимодействия различных факторов, действующих в широком временном диапазоне. В идеале, анализ структуры рельефа позволяет выявлять характер и масштабы действия каждого фактора, ответственного за его современное состояние, создает основы для прогноза направлений саморазвития, представляет рельеф в форме удобной для оценки и моделирования его влияния на геосистемные процессы. Основой такого анализа является отображение и описание множества форм рельефа, которые осуществляются в рамках двух основных направлений: представление форм через количественное описание их геометрии, и через образы или типы форм. Первый подход можно определить как морфометрический анализ.

При всем множестве методов параметризации в морфометрическом анализе, в конечном итоге, дело сводится к представлению элементарной формы рельефа в трех координатах пространства x , y , z , через их значения и значения двух или трех производных по каждой координате. Первая производная определяет крутизну и экспозицию, вторая выпуклость и вогнутость, третья искривления. В заключении, весь спектр различных морфометрических показателей обобщается в морфометрическом анализе, причем, некоторые из них имеют самостоятельное значение. Например, градиент, отображающий "наибольшую" крутизну, или "лапласиан", отображающий максимальную интенсивность "растекания и стекания потоков" (Пузаченко и др., 2002). Кроме того, морфометрический анализ дает возможность ввести представление об элементарной форме рельефа: для измерения двух первых производных по трем осям необходим элементарный квадрат со стороной из трех точек, для измерения трех производных из пяти, и четырех производных - из семи. Кроме отмеченных выше, используется много параметров, отражающих форму поверхности (Shary, 2002).

Анализ структуры рельефа Ямской степи производился по трехмерной модели, построенной на основе векторизованной карты масштаба 1:10 000 с сечением рельефа в 2.5 м. Целью анализа является определение параметров рельефа, оценка его текущего состояния, построения карт его типологического отображения и выделение речных бассейнов и характерных структур как основы для проектирования системы мониторинга состояния подземных вод и атмосферного переноса. Кроме того параметры форм рельефа на разных иерархических уровнях его организации рассматриваются в качестве факторов перераспределяющих атмосферное увлажнение, перенос вещества, приход солнечной радиации и соответственно потенциально, определяющих состояние почвы и растительности и в конечном итоге ландшафтную структуру территории. Рельеф рассматривался для территории прямоугольника со стороной 6320 и 5530 м. с географическими координатами северо-западного угла $X=402976,77$ м, $Y=5\ 673\ 950,52$ м

(в проекции UTM WGS 84, 37 зона). На рис.2 приведен общий вид территории. Статистические характеристики высот: средняя высота 202.6190 м, медиана 207.4 м, минимум 143.9 м, максимум 235.7 м, амплитуда высот 91.8 м.

Анализ иерархической организации рельефа производился по двумерному спектру Фурье. Согласно схеме Туркотта, двумерный спектр сворачивается в одномерный, после чего из него удаляется тренд и анализируются остатки. Присутствующие в спектрах периодические составляющие, ассоциируются с иерархическими уровнями. На рис.4 приведена оценка спектра по двум направлениям для территории при квадрате со стороной 50 м. В табл.2 приведены параметры уравнения регрессии. Модель описывает в среднем 75.7% варьирования. Полученная оценка фрактальной размерности для изображения $D=1.96$ (по одному направлению) и $D=1.97$ (по второму направлению) соответствует представлению о черном шуме. Черному шуму соответствует система самоподобных разномасштабных блоков, и это значение фрактальной размерности является показателем ступенчатой (блочной) структуры.

Табл.2. Параметры двумерного спектра по модели $\log(\text{Мощность спектра}) = b_0 + b_1 \log(1/\text{Период})$

1. Левый спектр R^2 75.060% Фрактальная размерность $D=(7-3.0795)/2=1.96025$

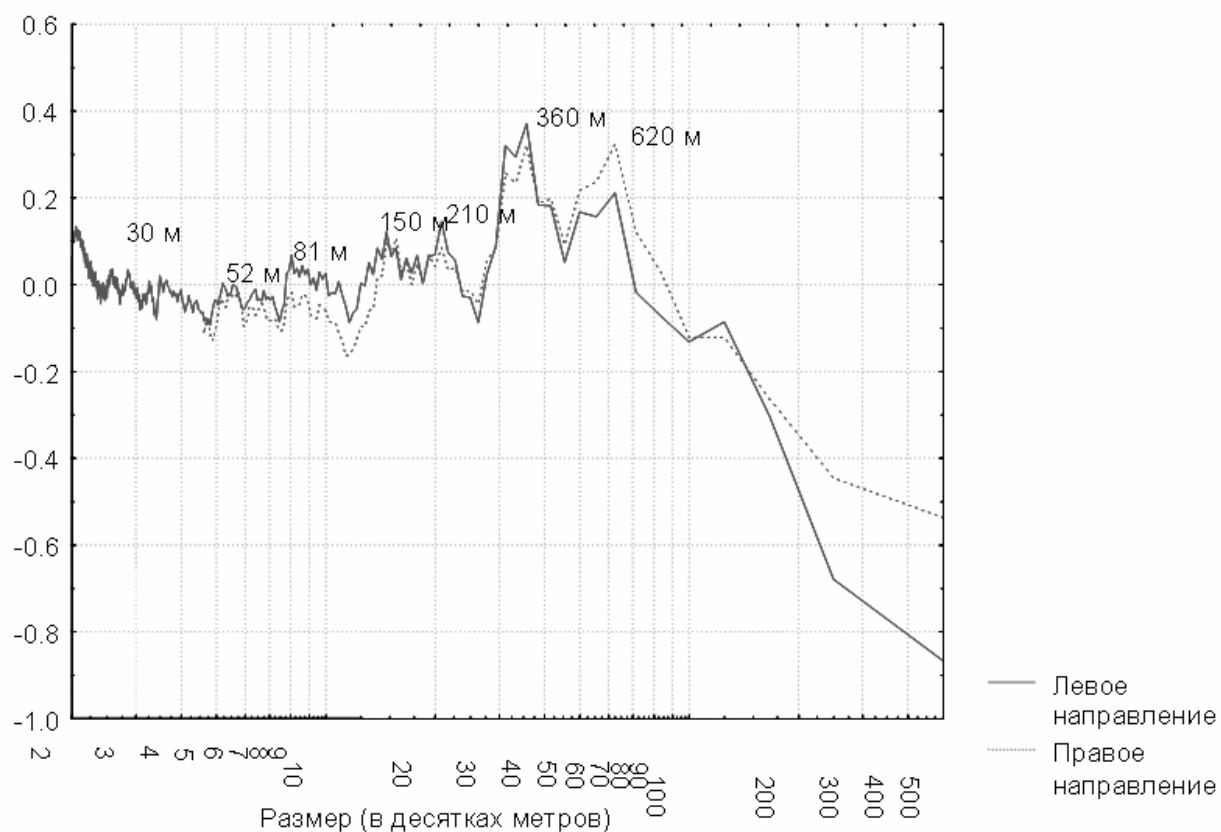
Параметры	B_0	B_1
Оценка	-11.2061	-3.0795
Среднеквадратическая ошибка	.2179	.1127
t-критерий	-51.4292	-27.3204
Уровень значимости	0.0000	0.0000

2. Правый спектр. $R^2 = 76.506\%$. Фрактальная размерность $D=(7-3.0525)/2= 1.97375$

Параметры	B_0	B_1
Оценка	-11.0855	-3.0525
Среднеквадратическая ошибка	.2076	.1074
t-критерий	-53.3884	-28.4181
Уровень значимости	0.0000	0.0000

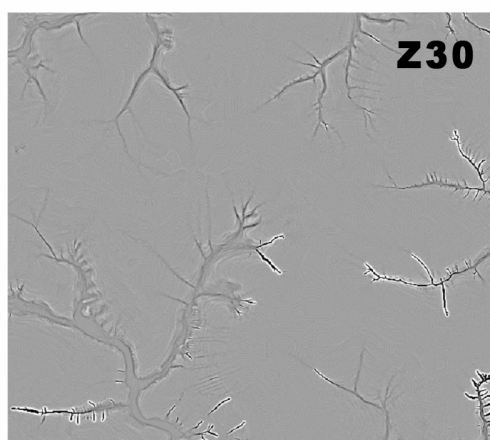
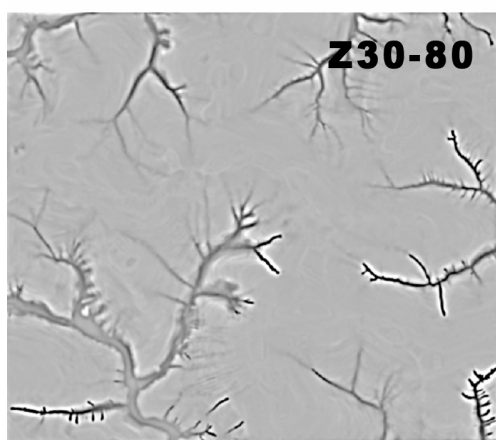
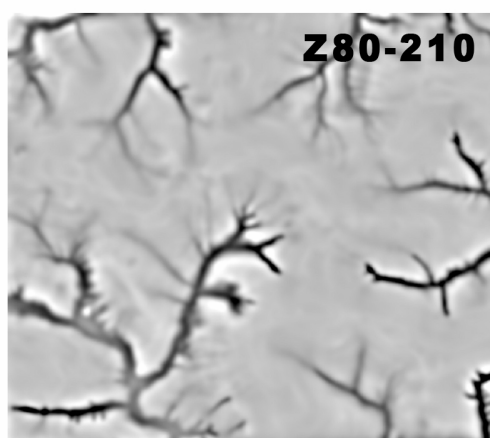
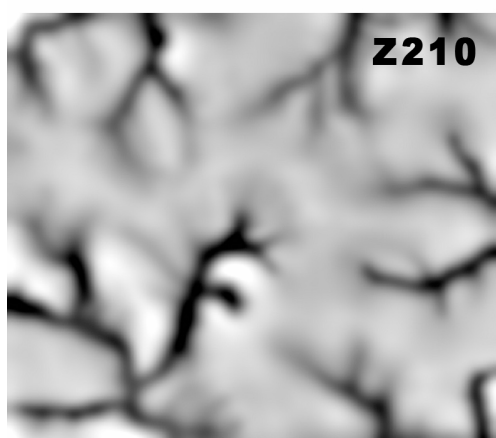
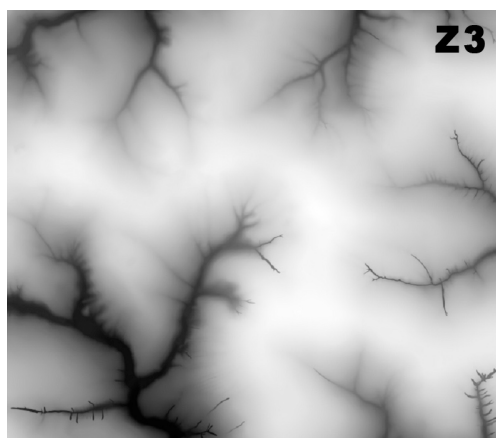
Из анализа графика отклонения от линейной регрессии «частота-логарифм спектра» (табл.1) можно сделать вывод, что в организации рельефа территории существуют иерархические уровни с размерами 30, 30- 81, 81—210, 210 и 620 м (рис.4).

Рис.4. Остатки от двумерного спектра, демонстрирующие иерархические уровни организации.



На рис.5 приведена пространственная структура реального рельефа (Z3) и рельефа на иерархических уровнях 600 м (Z600), 210 м (Z210), 80-210 м (Z80-210), 80 м (Z80), 30 м (Z30). Иерархические уровни построены обратным преобразованием Фурье в соответствующих полосах частот, определяемых по границам между соседними иерархическими уровня с помощью программы ImageJ (<http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>).

Рис. 5. Пять иерархических уровней организации рельефа.



3.2. Оценка степени стационарности рельефа.

Доказательством того, что рельеф территории Ямской степи близок к равновесному состоянию, являются результаты анализа рангового распределения высот (рис.6). Ранговое распределение высот не соответствует модели Гиббса, поскольку энтропия Кульбака, являющаяся показателем неравновесности системы, в этом случае отрицательна (табл.3). Распределение высот заповедника близко к модели Ципфа-Мандельброта, при этом энтропия Кульбака составляет 0.001376. Хотя χ^2 достоверно отличает реальное

распределение от модели, его величина очень мала, и можно признать поверхность очень близкой к стационарному состоянию.

Рис.6. Ранговое распределение высот.

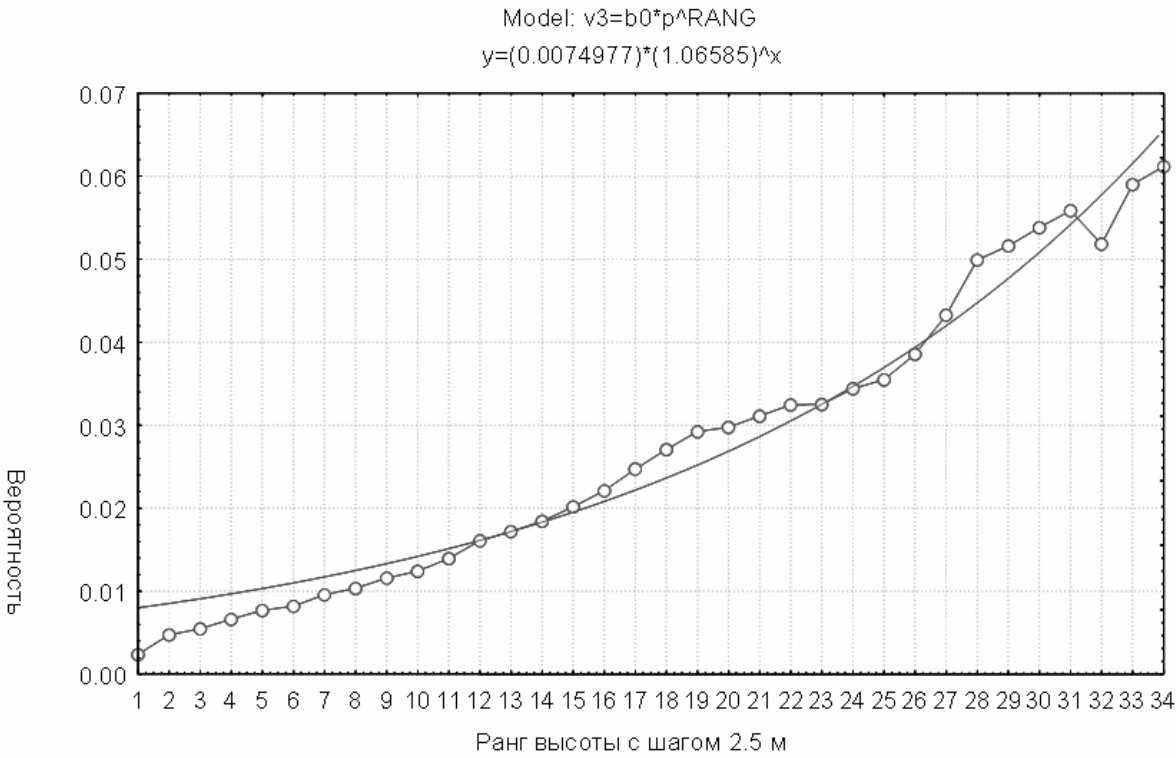


Табл. 3. Ранговые модели рельефа.

1. Модель Гиббса. Вероятность ранга $i = ap^{RANG}$
 $R^2 = 97.354\%$

Параметры	a	p
Оценка	.00750	1.0658
Среднеквадратическая ошибка	.00050	.0022
t-критерий	15.03193	489.5837
Уровень значимости	.00000	0.0000

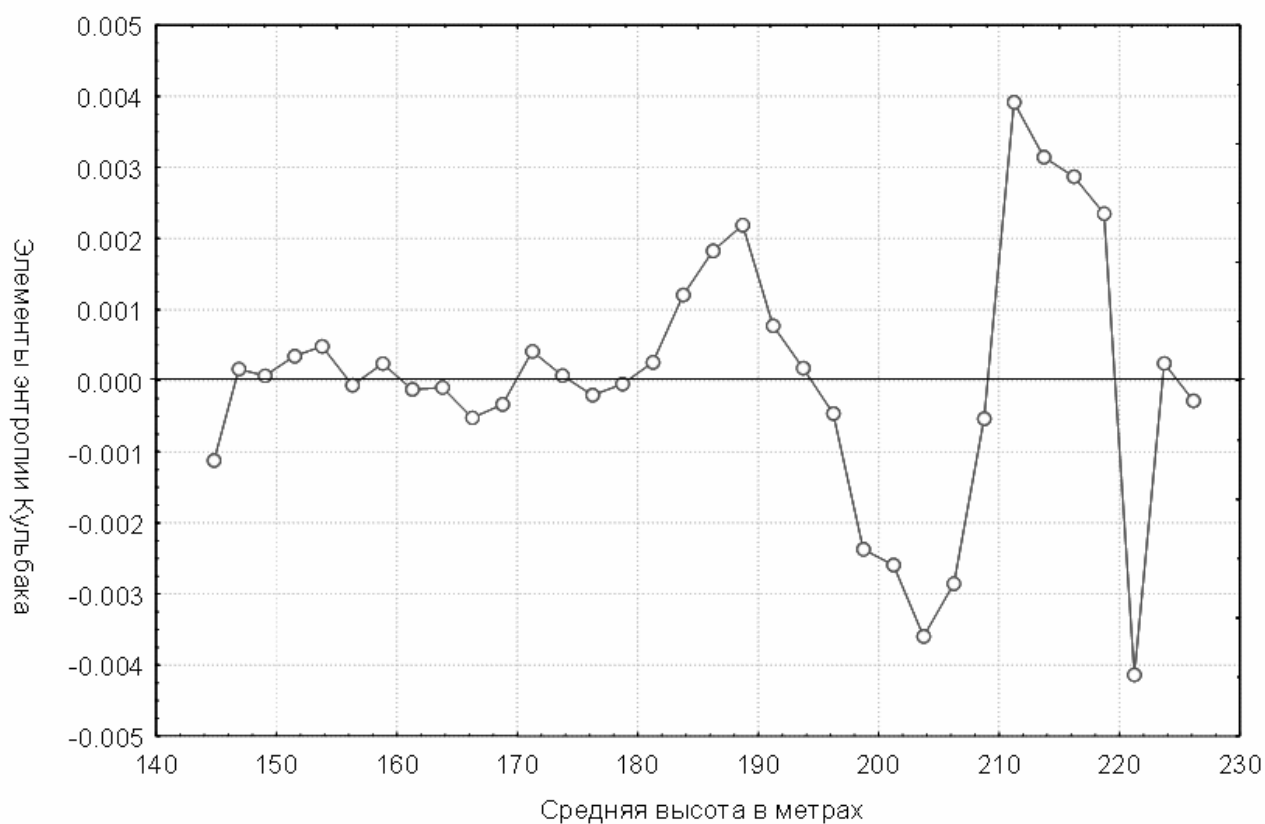
2. Модель Ципфа-Мандельброта. Вероятность ранга $i=b_0*(d+RANG)^{b1}$
 $R^2 = 98.987\%$.
Энтропия Кульбака $H_k= 0.001376$, $X^2=481.525696$ при 32 степенях свободы. Отклонение от равновесной модели статистически значимо.

Параметр.	b_0	d	$b1$
Оценка	.000047	9.003033	1.908570

На графике рангового распределения высот можно выделить три основных отклонения от линии равновесности, выделяющих две основных ступени. Очевидно, что они соответствуют ступеням, описанным в литературе (Михно, Горбунов, 2001).

Отрицательное отклонение при малых рангах высот отражает наличие потенциала медленного перераспределения материала сверху вниз. Также выделяются два положительных отклонения при высоких значениях рангов высот, которые связаны со ступенями коренном фундаменте, не полностью элиминированными денудацией. На рис.7 видно, что ступени в рельефе вносят наибольший вклад в нарушение стационарности. Также существенное значение в величину неупорядоченности с обратным знаком вносят своеобразные провалы перед этими ступенями.

Рис. 7. Выделение ступеней рельефа, как отклонений от равновесной модели.



В целом же соответствие распределения высот энергетическому показательному уравнению свидетельствует о существенной стационарности поверхности и, следовательно, об относительно слабом развитии денудационных и эрозионных процессов. Прямые полевые наблюдения подтверждают этот вывод. Живые овраги – большая редкость, профиль балок корытообразный, днища долин плоские, аккумулятивные, с очень редко выраженными руслами временных водотоков.

3.3. Выделение типов рельефа методами многомерного анализа.

Следующим блоком анализа рельефа Ямской степи являлось построение регрессионных моделей для иерархических уровней и их факторный анализ. В табл. 3 представлены параметры регрессионной модели, где зависимой величиной являлись значения высот, полученные из цифровой модели рельефа, а независимыми – значения высот по иерархическим уровням. Соответственно выделенные иерархические уровни (рис.4, 5) практически полностью описывают исходную трехмерную модель рельефа.

Табл. 4. Параметры регрессионной модели.

Исходная трехмерная модель рельефа-иерархические уровни
 $R^2 = 0.99811762$, Среднеквадратическая ошибка: 0.91306 м

Переменные	B	Стандартная ошибка	T=критерий	Уровень значимости
Константа (минимальная абсолютная высота н у м.)	125.9199	.014017	8983.12	0.00
Иерархический уровень –600 м	.2958	.000029	10310.67	0.00
210 м	.0722	.000050	1450.09	0.00
Z80_210	.0472	.000081	581.05	0.00
Z30_80	.0299	.000105	284.58	0.00
Z30	.0399	.000106	376.54	0.00

В табл. 5 представлены результаты расчета корреляции иерархических уровней поверхностей между собой.

Табл.5. Корреляция элементов модели.

Уровни	Z600	Z210	Z80_210	Z30_80	Z30
Z600	1.00	.46	.17	.06	.01
Z210	.46	1.00	.66	.25	.04
Z80_210	.17	.66	1.00	.65	.16
Z30_80	.06	.25	.65	1.00	.50
Z30	.01	.04	.16	.50	1.00

По результатам расчета корреляции можно сделать вывод, что наиболее высокая корреляция у соседних иерархических уровней. Это означает, что, например, 46 % варьирования на иерархическом уровне 210 м описывается варьированием на уровне 600 м и наоборот, и т.д. Если ставится задача классификации рельефа по иерархическим уровням его организации, то высокие значения корреляции делают необходимым

представить его через независимые главные компоненты, что обеспечит пропорциональный вклад в классификацию всех иерархических уровней (табл. 6)

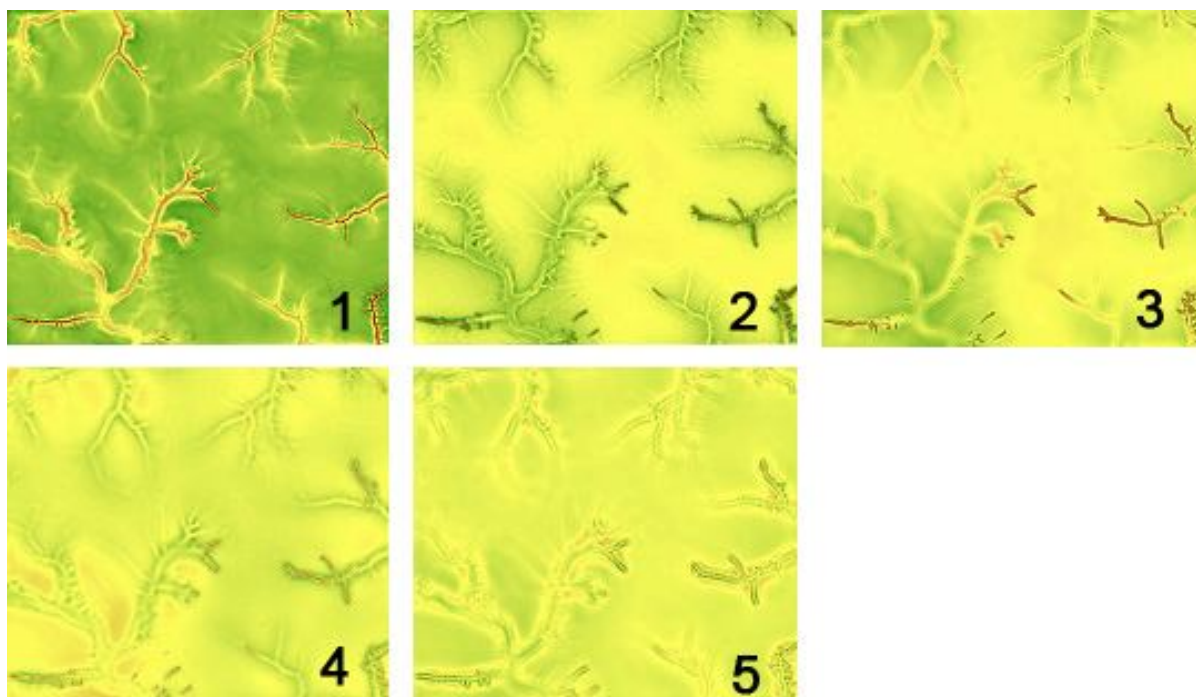
Табл.6. Результаты представления рельефа в системе главных компонент (факторов) анализа.

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Иерархический уровень 600 м	0.416724	0.624815	0.605449	0.257211	-0.056752
210 м	0.758005	0.494796	-0.099101	-0.373212	0.177475
80-210 м	0.878345	0.030842	-0.399855	0.031523	-0.258226
30-80 м	0.772640	-0.484667	-0.070238	0.356316	0.190346
30 м	0.432859	-0.665461	0.527407	-0.294047	-0.071927
Описываемое варьирование	2.304059	1.313908	0.819365	0.419864	0.142804
То же в %	0.460812	0.262782	0.163873	0.083973	0.028561

Из табл.6 следует, что рельеф с его иерархической организацией практически полностью отображаем в трехфакторном пространстве. При этом первый фактор интегрирует в первую очередь формы мезорельефа, а второй и третий—макрорельеф и микрорельеф, но в двух независимых комбинациях: большой высоте макрорельефа соответствуют минимальные высоты микрорельефа и той же высоте соответствуют максимальные высоты микрорельефа.

На рис.8 представлена пространственная интерпретация пяти факторов по результатам факторного анализа. Очевидно, что первый фактор отражает наиболее общие закономерности в строении рельефа. Сопоставление рисунков факторов 2 и 3 показывает природу их различий. Они отражают в основном особенности строения верховьев балок: второй фактор резкие врезы, а третий выпуклые склоны этих резко врезанных долин. Четвертый и пятый фактор отражают малозначащие детали строения рельефа на уровне мезоформ.

Рис. 8. Отображения иерархической организации рельефа через ортогональные факторы.



На основе описанных выше рассчитанных значений факторов была проведена классификация по методике, предложенной Ю.Г. Пузаченко, и др. (2002). Цель классификации в общем случае— отображение явления через дискретные состояния или образы, с которыми связаны конкретные структурные и функциональные свойства. Согласно авторам реферируемой статьи, любая классификация строится на основе выделения групп подобных элементов классифицируемого множества по степени их сходства. Оценка сходства различия между элементами осуществляется на основе метрики. Сравнение по размеру (объему) осуществляется с помощью дистанции Минковского, частным случаем которой является дистанция Евклида:

$$D_{ij}=(\sum |x_i^k-x_j^k|^p)^{1/p},$$

где x_i^k – значение k- переменных в точке i (j) , $k = 1-m$, m – число переменных, p – степень разности значений одноименных переменных, Σ - сумма m-разностей, r – значение корня из суммы.

В частном случае при $p = r = 2$ имеем дистанцию Евклида, при $p=r=1$ – Манхетэн – дистанцию.

Классификация, применяемая в анализе структуры рельефа Ямской степи, основывается на специально разработанном для классификации очень больших объемов данных дихотомическом методе, использующем логику классификации метода К-средних.

Физический смысл полученных классов описывается средними значениями переменных и факторов в каждом классе на разных иерархических уровнях классификации.

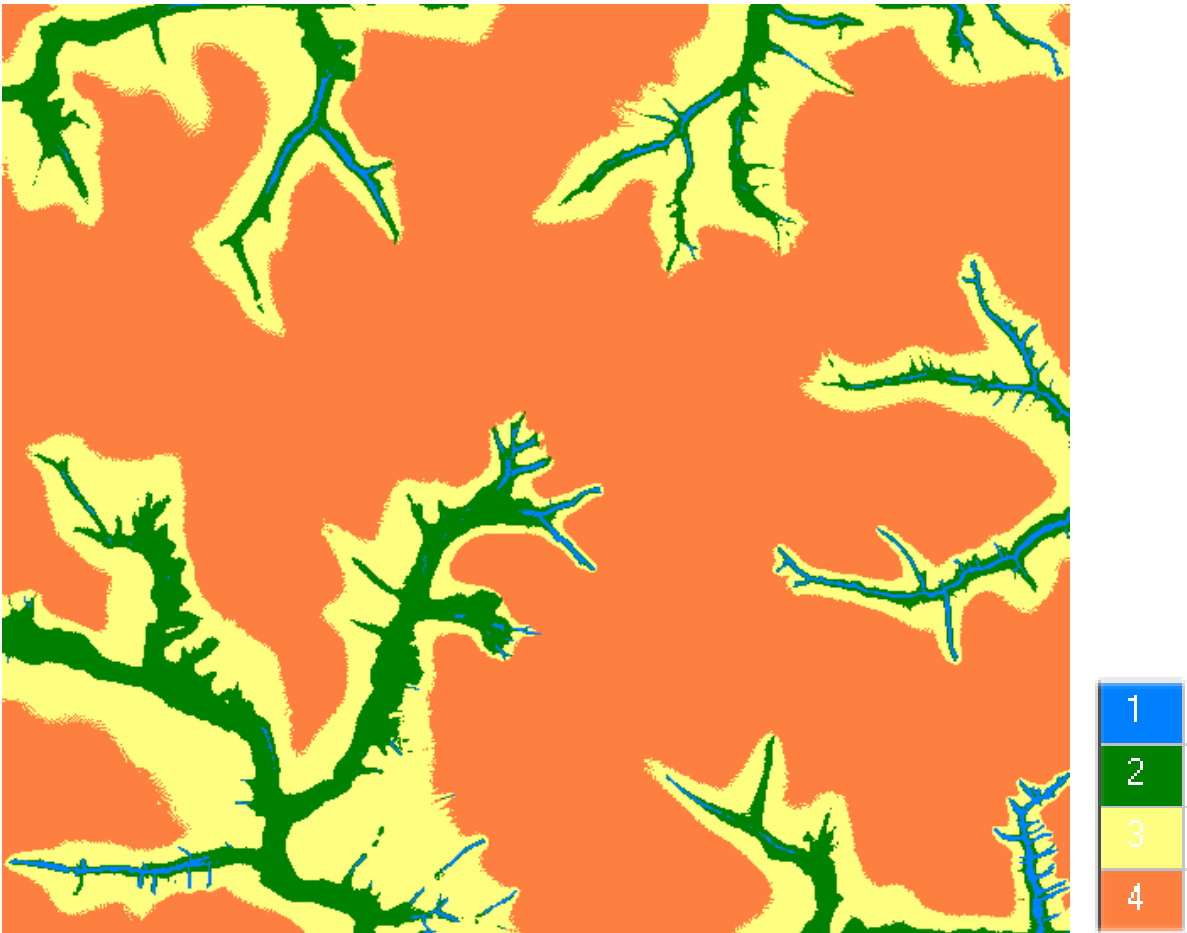
Так как эта схема построения классификации рассматривается на всех уровнях анализа как рельефа, так и отдельных компонентов, проиллюстрируем логику определения содержания классов для двух уровней классификации.

В табл. 7 приведены значения относительных высот для иерархических уровней и значения трех первых факторов для второго уровня классификации, а на рис. – ее пространственная интерпретация.

Табл.7. Идентификация содержания, выделенных классов по исходным данным и значениям факторов.

Типы	Иерархические уровни					Факторы			Определение
	600	210	80_210	30_80	Z30	1	2	3	
1	128	70	48	38	48	-2.15	-0.96	0.24	Врезы верхних частей долин
2	81	57	90	130	137	-1.03	0.20	-0.06	Днища балок
3	103	126	174	177	147	-0.04	0.26	0.08	Макросклоны. Вторая ступень рельефа
4	190	184	180	167	141	0.19	-0.11	-0.03	Приводораздельные поверхности. Первая ступень рельефа

Рис.9. Второй уровень классификации рельефа по иерархическим уровням его организации.



Сопоставляя высоты, значения факторов и соответствующую карту получаем, что первый класс выделяет наиболее низкие поверхности в мезо- и микрорельефе, но на относительно больших высотах макрорельефа. Семантическая интерпретация этого типа очевидна – это наиболее четко выраженные врезы верховьев балок. Второй тип, напротив, выделяет формы рельефа на самых низких высотах макрорельефа и первого уровня мезорельефа, но на относительно больших высотах четвертого уровня мезорельефа и микрорельефа. Очевидно, что это днища балок, которые выделяются в двух формах мезорельефа, но при средних высотах более мелких форм, отображающих уплощенное строение их днищ. Практически максимальные высоты на всех иерархических уровнях (четвертый тип) выделяют приводораздельную поверхность, а третий тип - ступень второго уровня с большими относительными высотами мезо и микроформ. Этот тип может быть определен как макросклоны. Таким образом, уже на верхнем уровне классификации выявляется весьма специфическое строение эрозионной сети и две ступени в строении рельефа, учет которых совершенно необходим при организации гидрогеологического мониторинга.

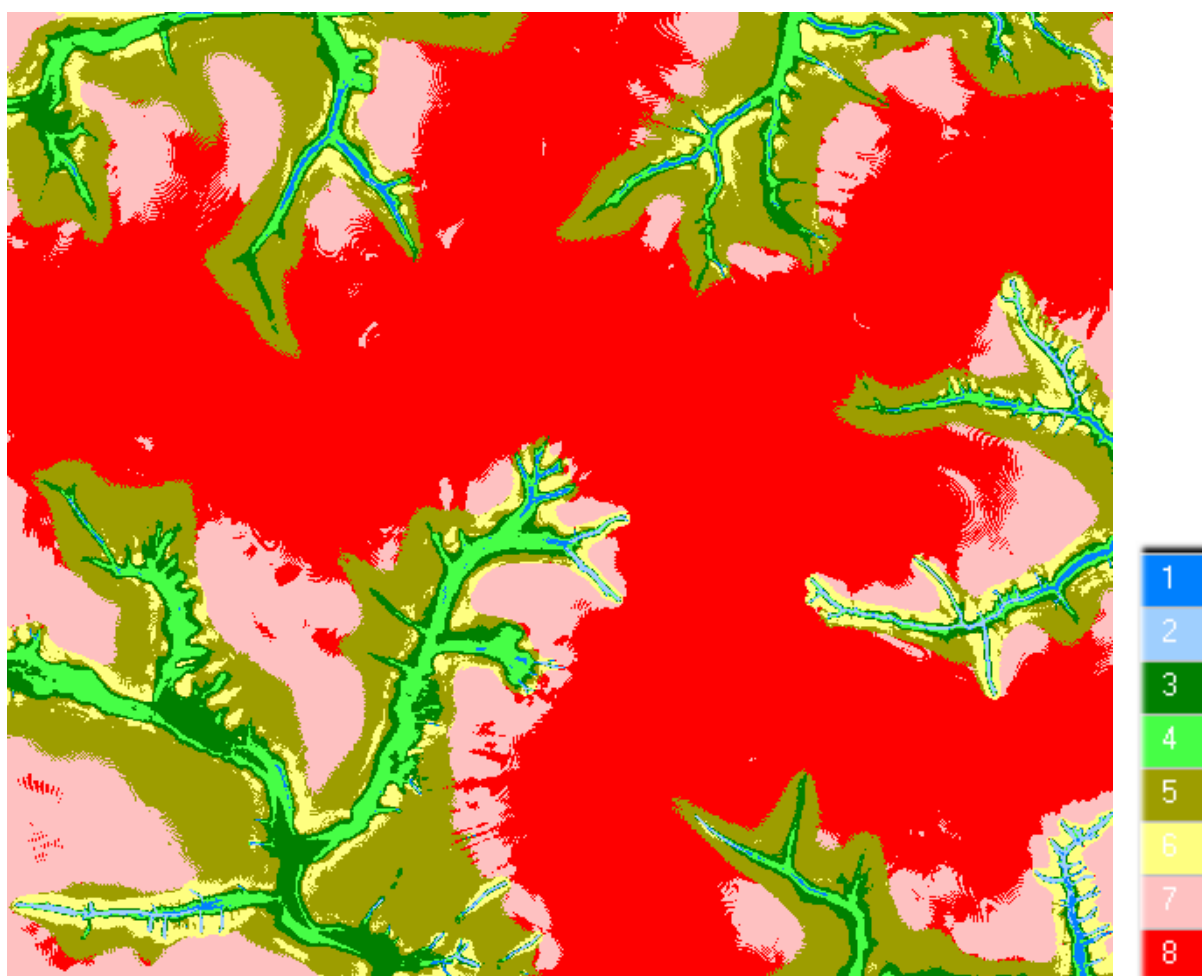
Следующий уровень классификации вносит соответствующую детализацию в характер строения поверхности. В табл.8 приведены относительные высоты иерархических уровней и значения трех ведущих факторов для третьего уровня классификации, на рис.10 – пространственная интерпретация классификации. На этом уровне хорошо видна асимметрия склонов и приуроченность перистообразных структур долин первого порядка к восточным и северо-восточным бортам долин.

Табл.8. Идентификация содержания, выделенных классов по исходным данным и значениям факторов для третьего уровня классификации.

Тип	Иерархические уровни					Факторы			Определение
	600 м	210 м	80-210 м	30-80 м	30 м	1	2	3	
1	143	80	44	11	5	-2.50	-1.44	0.45	Днища врезов верхних частей долин
2	115	62	51	59	82	-1.88	-0.57	0.08	Уплощенные днища врезов верхних частей долин
3	81	46	65	108	128	-1.36	0.07	-0.08	Вогнутые краевые части днища балок
4	81	65	108	145	144	-0.79	0.30	-0.05	Плоские днища балок
5	103	103	179	209	168	0.22	0.60	-0.03	Выпуклые макросклоны. Вторая ступень рельефа
6	103	131	173	169	142	-0.10	0.19	0.10	Вогнутые

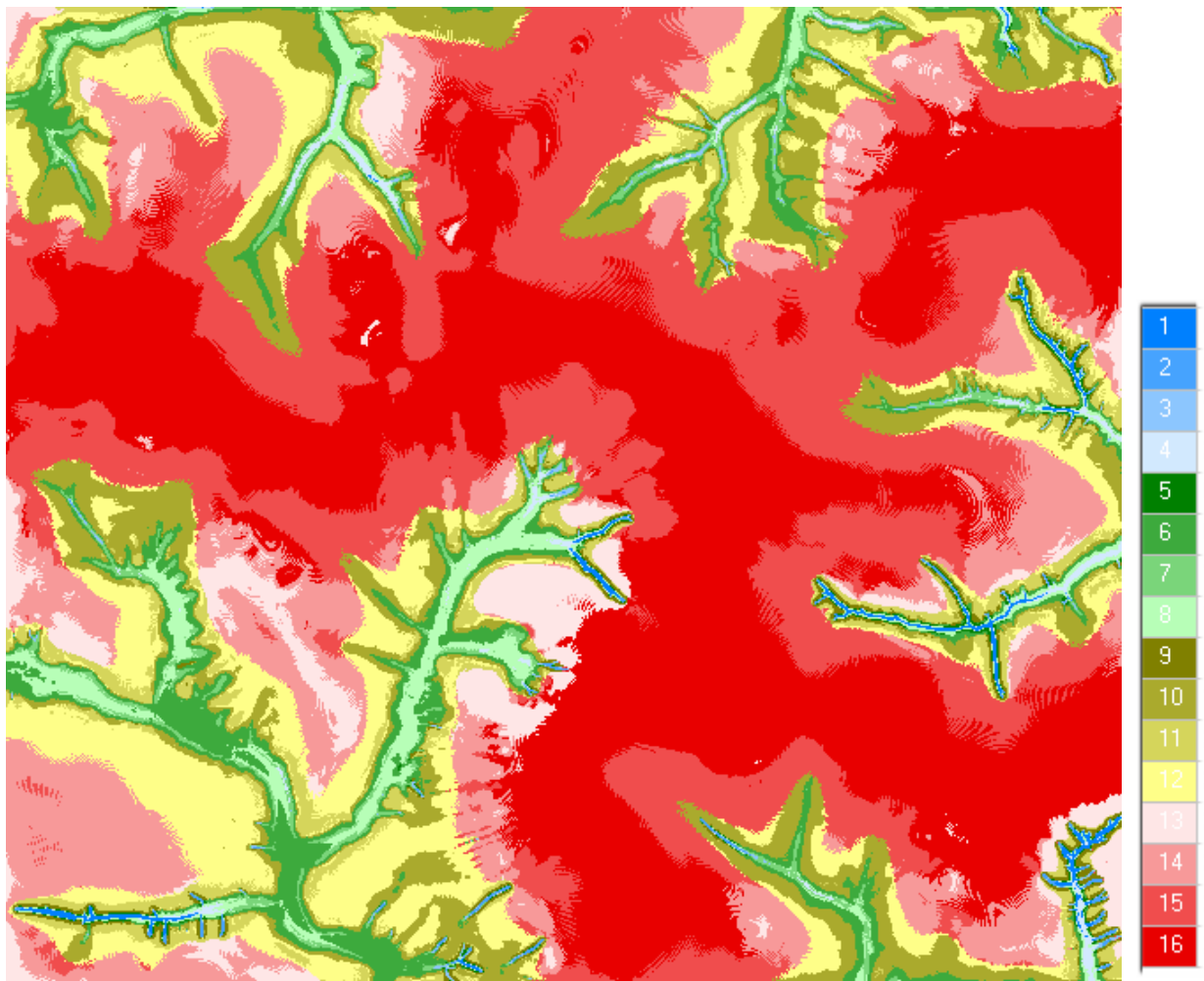
									макросклоны. Вторая ступень рельефа
7	136	201	196	172	142	0.29	-0.01	0.12	Выпуклые притокораздельные склоны. Первая ступень рельефа
8	208	178	175	165	140	0.16	-0.14	-0.07	Плоские притокораздельные поверхности. Первая ступень рельефа

Рис. 10. Третий уровень классификации рельефа по иерархическим уровням его организации.



Более подробно строение территории отображается на четвертом уровне классификации. На рис.11 представлена пространственная интерпретация четвертого уровня классификации. Водораздельная поверхность дробится более подробно, индицируя особенности ее структурной организации. Также отображаются области потенциальной трещиноватости фундамента, что имеет особую важность при планировании размещения скважин гидрогеологического мониторинга

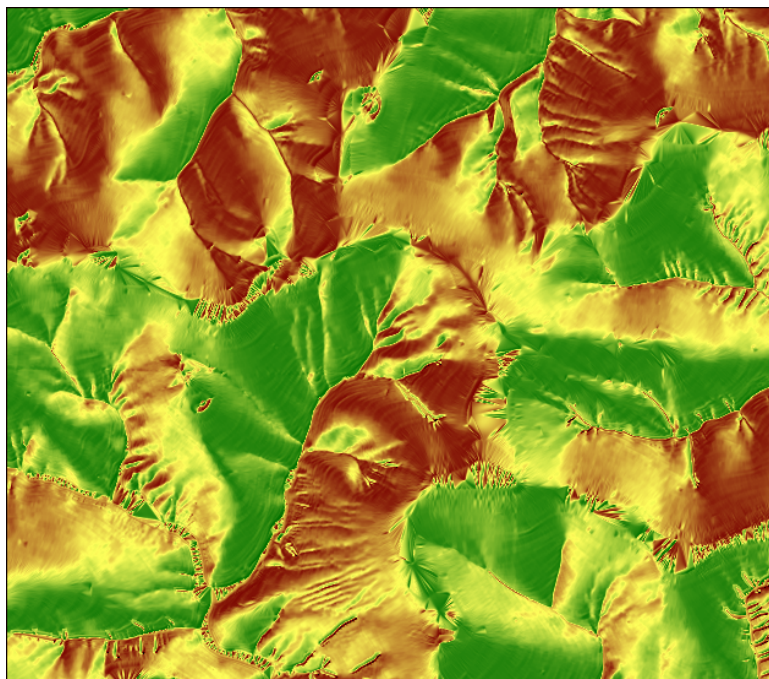
Рис.11. Четвертый уровень классификации рельефа по иерархическим уровням его организации.



Таким образом, предлагаемая версия классификации отражает комбинацию высот различных иерархических уровней, в целом выделяющих различные типы рельефа.

Как многомерное явление, рельеф допускает классификацию по различным свойствам, которые будут содержать информацию о различных аспектах его организации. В частности, важным представляется использовать такое свойство, которое позволило бы с высокой надежностью выделить тальвеги и водораздельные линии. Эта система отображения необходима для обоснования выбора гидрогеологического и гидрологического мониторинга. Желаемый результат достигается при использовании метрики максимальности разности высот от центральной точки скользящего квадрата 50х50 м к любой из принадлежащих ему точек (рис 12).

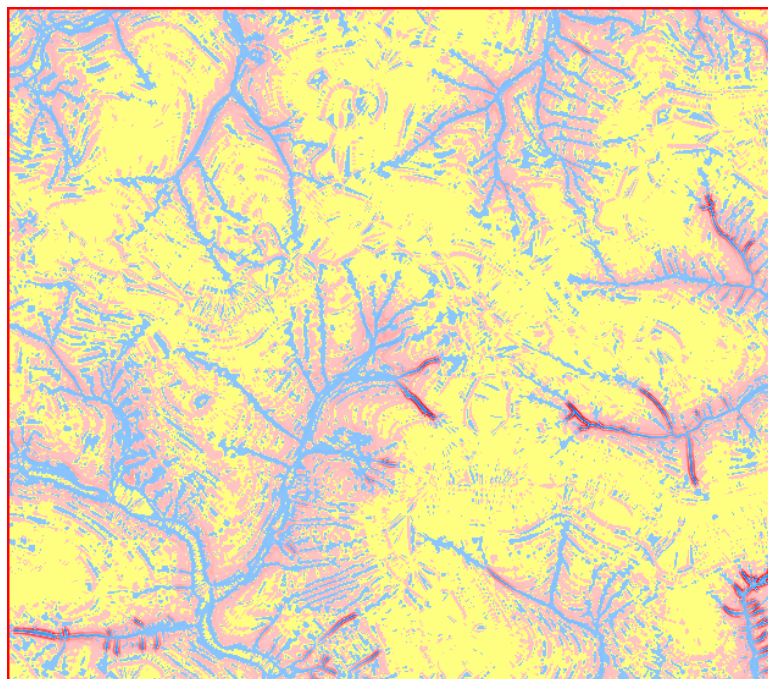
Рис.12 . Структурно-морфологическая классификация рельефа. Зеленые тона – вогнутая поверхность, коричневые – выпуклая.



Если величина значительна и знак положителен, то это означает, что средняя точка ниже остальных. Соответственно, такое соотношение индицирует вогнутую форму поверхности, и чем больше значение, тем больше ее крутизна. В противном случае форма склона выпуклая. Эта операция показывает высокую асимметричность парагенетических поверхностей, разделенных или водоразделом, или тальвегом. Западные и северные склоны в большей степени выпуклые, чем противоположные. При этом сами водоразделы и тальвеги выделяются промежуточным желтым тоном. Изображение позволяет однозначно выделить водоразделы и, соответственно, бассейны водосбора каждой балки. В среднем южные и восточные склоны в большей своей части почти плоские, переходящие в балки относительно крутым вогнутым коротким склоном, а противоположные склоны более выпуклые и покатые. Таким образом, принципиальная структурная дифференциация склонов - характерная особенность рассматриваемой территории.

Следующий способ анализа основывается на оценке максимального значения второй производной в скользящем квадрате (рис. 13).

Рис. 13. Форма поверхности рельефа.



Голубой тон хорошо выделяет тальвеги, а на водораздельной поверхности мелкие суффозионные воронки. Красный тон выделяет выпуклые поверхности, естественно локализирующие склоны балок. Желтый тон отражает практически ровные поверхности. Детальная фиксация системы водотоков и связанных с ними суффозионных и частично карстовых воронок дает хорошую основу для обоснования размещения системы наблюдений по программе мониторинга. Вместе с тем карта дополнительно демонстрирует асимметрию склонов: северные и западные склоны крупных балок осложнены сложной системой параллельных вогнутых форм, в то время как на противоположных бортах такая тонкая эрозионная система отсутствует и вогнутый склон имеет однородную структуру.

Таким образом, один склон выпуклый и мелко линейно расчлененный, а противоположный вогнутый и слабо слаборасчлененный. На местности с выпуклыми расчлененными склонами связаны выходы мелов. Очевидная асимметрия долин позволяет рассматривать рельеф территории как куэстовоподобный. Выпуклый склон с высокой трещиноватостью маркирует склон куэсты с малой мощностью неоген-четвертичных отложений, а противоположный вогнутый склон маркирует слабodeформированный пласт доломитовых отложений, перекрытых неоген-четвертичными отложениями.

Такая структура рельефа определяет схему заложения скважин гидрогеологического мониторинга. Выпуклый борт долин сильно трещиноватый и, скорее всего, имеет очень высокую водопроницаемость. Соответственно, атмосферные осадки с этого склона слабо влияют на грунтовые воды в балке. Подземный сток в балку поступает в основном с

противоположного пологого склона. Гидрологический режим в различных водоносных горизонтах наиболее стационарно связан со всем гидрологическим бассейном и, соответственно, измерения, осуществляемые именно на этом склоне, могут наилучшим образом отразить его общую динамику.

На основе анализа выделяются важнейшие функциональные свойства рельефа; асимметрия и принципиально различное строение противоположных склонов, потенциальная схема гидрологических связей водораздельных поверхностей, оврагов и балок, локализации карстовых форм.

Таким образом, классификация рельефа, строящаяся на основе различных переменных (факторов из факторного анализа иерархических уровней, оценки максимальной разности высоты центральной точки скользящего квадрата 5x5 пикселей (50x50 м) от всех остальных с учетом знака, второй производной) позволяет в полной мере отображать многообразие свойств рельефа, как раскрывающих некоторые стороны его генезиса, так и обеспечивающих использование этих свойств в качестве основы для решения комплексных и прикладных задач географии, в частности, при проектировании системы экологического мониторинга, а также при обосновании комплексных экологических исследований.

Если выбор переменных и метод классификации достаточно обоснованы и мотивированы с позиций отображения интересующих исследователя процессов, то классификация позволяет выявлять реально существующие структуры и связанные с ними отношения. Объяснение генезиса этих структур требует проведения специальных дополнительных исследований, результаты классификации могут выступать важным основанием для выбора конкурирующих гипотез и конкретных мест исследования при их планировании.

3.4. Представление рельефа через его свойства.

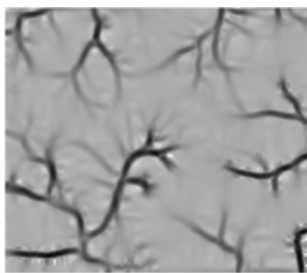
Согласно «Системно-морфологическому основанию наук о Земле» (Ласточкин, 2002), структура компонентов ландшафтов проявляется в результате их взаимодействия в зоне контакта у земной поверхности, которая является универсальным интегрирующим и перераспределяющим фактором, превращающим происходящие в поле инсоляционных и гравитационных сил вертикальные (межкомпонентные) и горизонтальные (межсистемные) взаимодействия в определенные территориальные структуры. Рельеф земной поверхности выступает в качестве главного дифференцирующего пространственного инварианта, относительно которого происходит транспортировка

вещества и энергии и их трансформация в ходе перемещения. Можно принять, что рельеф занимает фиксированное в системе географических координат положение, поскольку его характерное время имеет значительную продолжительность, в то время как воздушные, водные и литогенные массы относительно него перемещаются, а их кинематика рельефом контролируется. И, наконец, рельеф--параметризуемая и формализуемая часть трехмерного географического пространства. Таким образом, рельеф, как наиболее инерционная, параметризуемая и оказывающая наиболее сильное влияние на структуру и организацию региональных геокомплексов их часть, может служить матрицей структурированности, «системой отсчета» взаимного положения и взаимодействия элементарных единиц геокомпонентов.

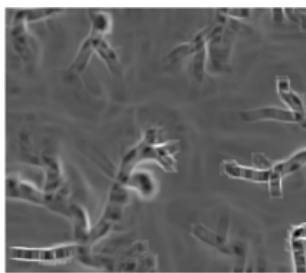
Для организации системы экологического мониторинга анализ структуры рельефа важен, прежде всего, в том плане, что позволяет выделить в рельефе потенциальные ловушки переносимого с воздушными массами вещества, области аккумуляции отложений, определить зоны потенциальной трещиноватости фундамента как области высокой гидравлической связи, а также позволяет оценить возможные объемы подтопления территории в результате повышения уровня грунтовых вод.

В соответствии с этим для анализа влияния рельефа на состояния свойств компонентов ландшафта в качестве основных переменных вводятся: показанные выше поверхности различных иерархических уровней и для каждого иерархического уровня наклон поверхности, освещенность с юга, экспозиция, максимальная и минимальная кривизны. (расчет этих переменных осуществлялся в программе ENVI). На рис. 14 в качестве примера приведены их изображения для уровня организации 270 м.

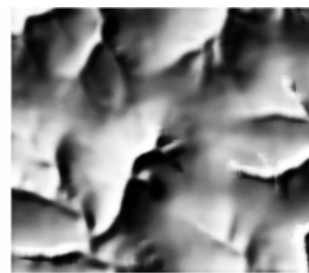
Рис.14. Переменные рельефа, использующиеся в анализе для оценки влияния рельефа на состояния свойств компонентов ландшафта.



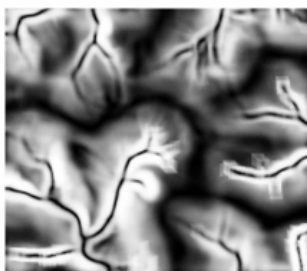
Минимальная кривизна
(вогнутость)



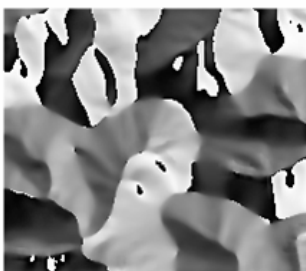
Максимальная кривизна
(выпуклость)



Освещенность
с юга



Крутизна склонов



Экспозиция

Минимальная кривизна поверхности отражает вогнутость форм рельефа, приуроченных к тальвегам. Темный тон на рисунке обозначает наиболее вогнутые формы, локализованные в основном в долинах балок. Максимальная кривизна поверхности, напротив, отображает выпуклые формы бортов и склонов балок светлым тоном, а плоские поверхности, приуроченные к водоразделу, отображаются серым тоном – средним значением переменной. Освещенность с юга с углом солнца 45^0 , являющаяся косвенной характеристикой экспозиции, отражает интенсивность прихода солнечной радиации на поверхность рельефа. При этом наибольший приход солнечной радиации будет на склоны южной экспозиции. Основное отличие экспозиции от освещенности заключается в том, что расчет производится не по интенсивности прихода солнечной радиации, а по румбам. Т.е. склоны восточной экспозиции имеют румб, равный 45^0 , западной – 270^0 , южной – 180^0 . Склоны северной экспозиции имеют румбы 360^0 и 0^0 одновременно, и это создает определенные сложности при использовании этой переменной для анализа территории, где присутствуют склоны всех экспозиций. Наконец, крутизна склонов отражает градиент изменения высоты в скользящем квадрате от центральной точки. Чем больше крутизна, тем светлее тон, которым она отображается. Темными тонами отображаются субгоризонтальные поверхности. Наиболее крутыми являются склоны балок, наиболее пологими – водораздельная поверхность.

3.5. Техногенное преобразование рельефа.

Исходный рельеф в северной части территории существенно трансформирован в результате деятельности Лебединского горно-обогатительного комбината. Характер и масштаб этой трансформации можно показать на основе сравнения трехмерной модели исходного рельефа, построенной на основе векторизации топографической карты масштаба 1:10 000, с трехмерной моделью современного рельефа, построенной на основе общедоступных данных радарной космической съемки SRTM (рис. 15).

Рис.15. Техногенная трансформация рельефа.

1. Исходный

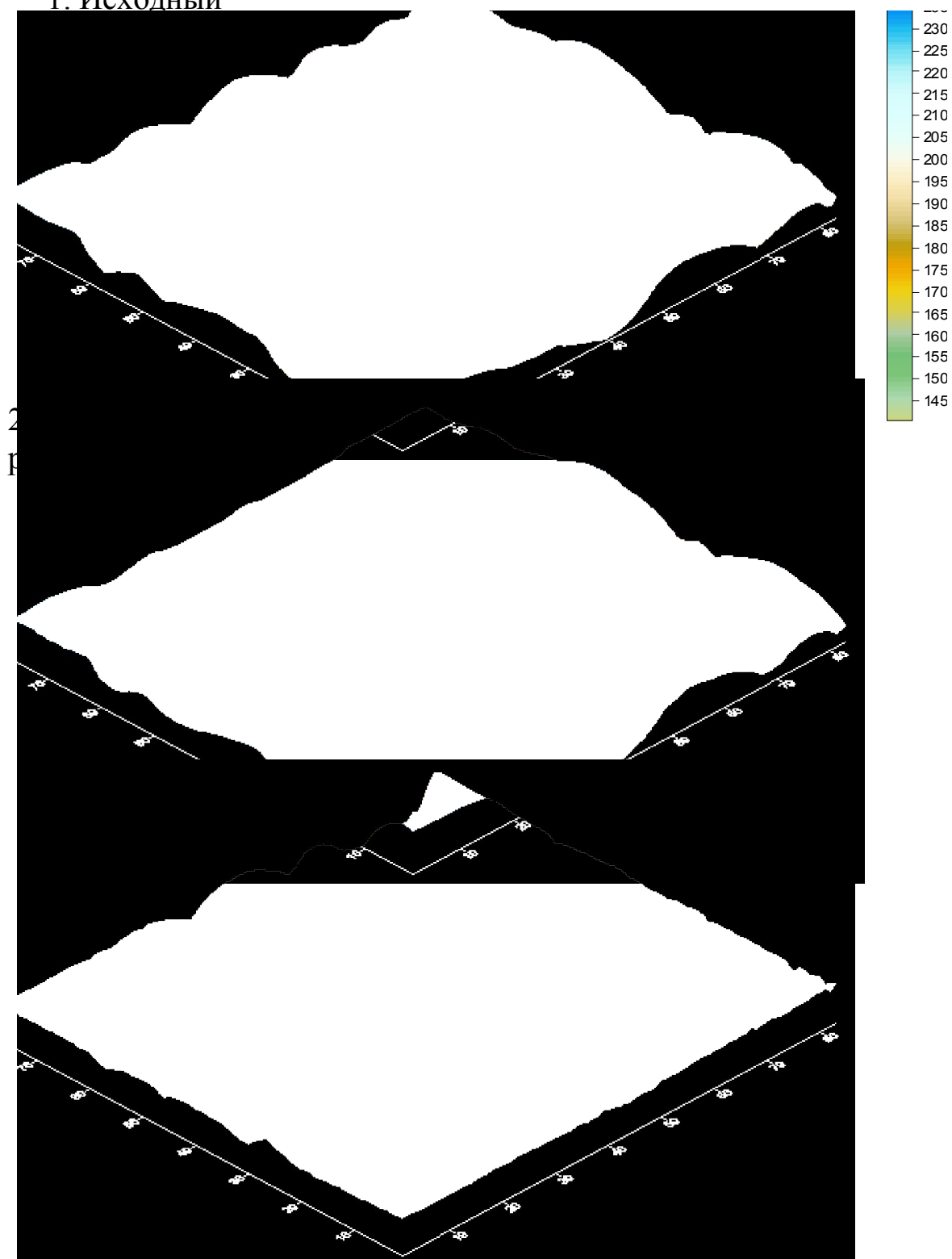
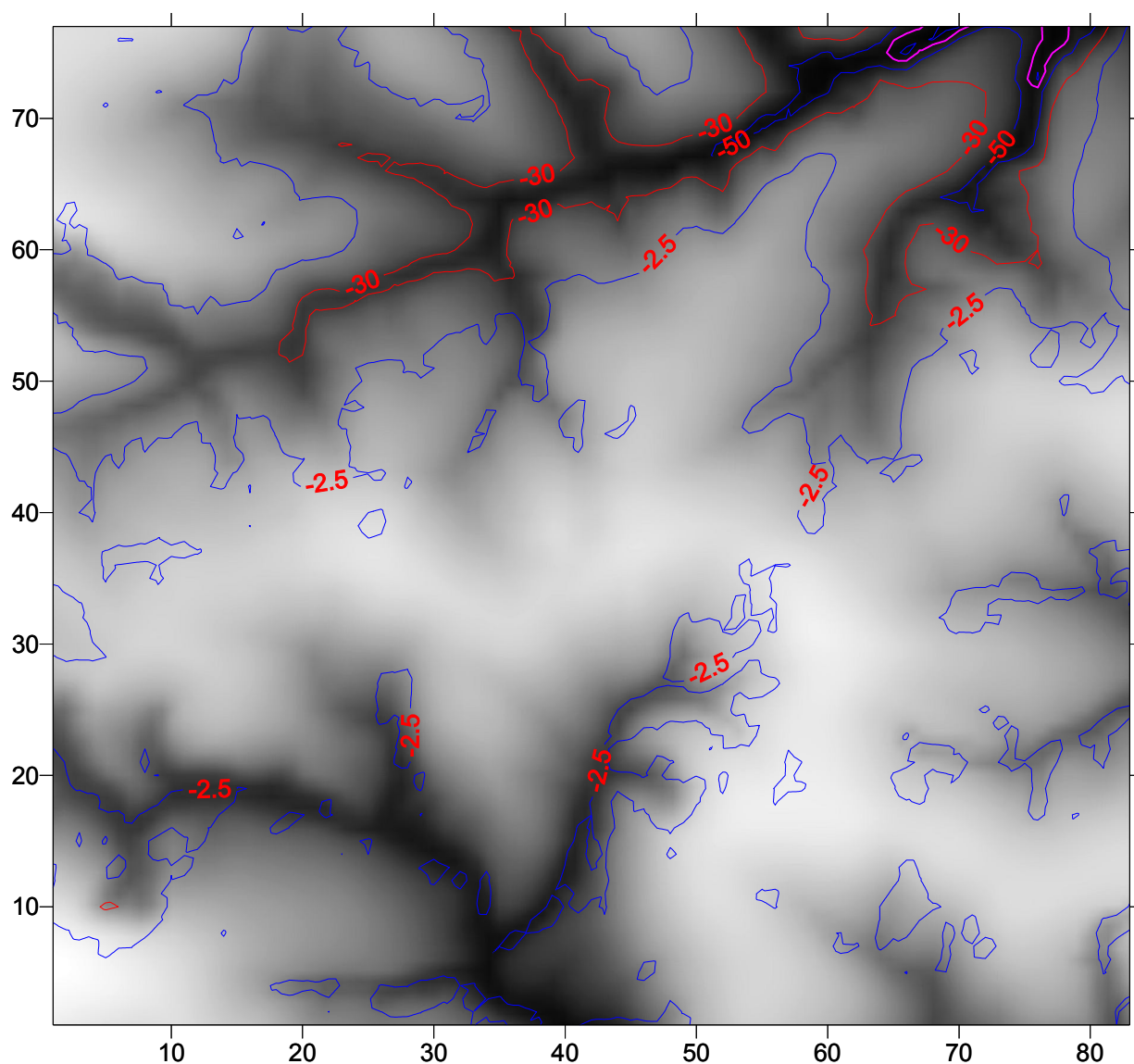


Рис.16. Изменение базиса стока.



Как видно из рис.15,16, балка Казиновка на северо-востоке территории, являвшаяся естественным базисом подземного стока, полностью уничтожена. Сохранена верхняя часть балки Сура в примыкающей к заповеднику самой северной части территории, в конце которой в настоящее время расположен дренажный пруд.

На рис.16 показаны основные горизонталы, отражающие мощность техногенных отложений. Следует иметь в виду, что над лесами радарная съемка дает большие значения высот, чем существующие на поверхности рельефа. Фактически сравнение съемки из космоса с топографической картой дает высоту леса. Этим объясняются пятна повышения рельефа вне зоны преобразования рельефа комбинатом.

Сравнение показывает, что базис стока в северной и западной части заповедника повысился на 30 м, а в восточной на 60 м. Голубая линия с отметкой – 2,5 м фактически

маркирует современный базис стока. Эта линия позволяет оценить потенциально возможные масштабы подтопления. В северной части заповедника происходит интенсивный дренаж через пруд. Но западная и, особенно, восточная части не обеспечены таким дренажом и грунтовые воды формируются при существенно повышенном базисе стока. Следует отметить, что автору не удалось обнаружить данные по исходному уровню подземных вод на территории заповедника до начала работы ГОКа. На основе анализируемой карты исходной поверхности можно полагать, что водотоки появлялись при абсолютных отметках 130-134 м, что содержит некоторую информацию о примерном положении «линзы» вод.

В итоге, простое сравнение исходного и антропогенного рельефа позволяет оценить потенциальную область и интенсивность антропогенного изменения гидрологической среды заповедника.

Таким образом, анализ рельефа позволил создать основу для построения ландшафтной карты и вывести важные основания для проектирования гидрологического и гидрологического мониторинга, к которым относится доказательство асимметрии склонов и наиболее вероятного направления подземного стока по плоским северным и северо-восточным склонам, выделение западин, связанных с верховьями балок и являющихся удобными точками контроля уровней подземных вод на разных глубинах, однозначное выделение тальвегов и бассейнов как относительно автономных гидрологических и гидрогеологических объектов, определения примерной области изменения уровня грунтовых вод в результате техногенного изменения базиса стока.