

УДК 631.4:634.9

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПОРОЕВ СЛЕПЫША *SPALAX MICROPHTHALMUS*

Пахомов А. Е.¹, Кунах О. Н.¹, Коновалова Т. М.¹, Жуков А. В.²

¹Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск, a.pakhomov@i.ua

²Днепропетровский государственный аграрный университет, Днепропетровск

В работе приведены результаты изучения влияния роющей деятельности слепыша на пространственную неоднородность почв. Показана эффективность ГИС-технологий для оценки воздействия педотурбационной активности на создания гетерогенности почвенного покрова. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение функции Рипли является эффективным инструментом описания характера пространственного распределения пороев млекопитающих. Установлено, что в пределах изученного полигона распределение пороев в диапазоне от 0 до 0,7 м является однородным, при превышении 0,7 м распределение становится случайным. Приведены свидетельства того, что роющая деятельность слепышей является важным фактором формирования мозаичности почвенного покрова.

Ключевые слова: педотурбационная активность, порою, твердость почвы, функция Рипли.

ВВЕДЕНИЕ

Экосистемными инженерами являются организмы, которые прямо, либо опосредовано модулируют доступность ресурсов для других видов путем изменения физического состояния абиотических и биотических материалов, модифицируя, поддерживая и (или) создавая местообитания [5]. Деятельность слепышей отнесена к категории аллогенного экосистемного инжиниринга. Аллогенные инженеры изменяют окружающую среду путем трансформации живых либо неживых материалов из одного состояния в другое путем механических либо иных преобразований [4, 5]. Слепыш в процессе педотурбационной активности строит систему подземных ходов и выбрасывает на поверхность почву в виде пороев. Соответствие аллогенному механизму подтверждается тем фактом, что при этом преобразуется почвенная масса из одного состояния (находится в равновесном состоянии в почвенной толще в составе соответствующего генетического горизонта) в другое состояние (находится выше уровня почвы в очевидном неравновесном состоянии, как с позиций механики, так и химизма своего состава). Эта трансформация модулирует распределение ресурсов, таких как вода, минеральные вещества, баланс энергии, создаются условия для аэрации почвы [4].

Цель наших исследований – изучить пространственную организацию системы пороев слепыша *Spalax microphthalmus* Gldenstaedt (1770). В задачи исследования входило: установить морфометрические характеристики пороев слепышей как меры интенсивности педотурбационной активности; выявить закономерности пространственного размещения пороев, оценить роль педотурбационной деятельности слепышей в формировании пестроты почвенного покрова.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Главная идея исследования состоит в том, что роющая деятельность слепышей привносит существенную пестроту в структуру почвенного покрова, для выявления которой необходимо применение геоинформационных подходов. Для сбора пространственно-координированных данных был заложен экспериментальный полигон на участке степной целины на склоне байрака Яцев Яр северной экспозиции (48°19'31.60"С.Ш., 35°11'39.15"В.Д.) (Днепропетровская область).

Полигон представляет собой совокупность из 100 соприкасающихся ячеек размером 1×1 м. Ячейки составляют 10 трансект по 10 ячеек в каждой. Полигон имеет форму квадрата со стороной 10 м, стороны квадрата ориентированы по направлениям восток–запад и север–юг. По углам ячеек были произведены измерения почвенных свойств и отобраны пробы для агрохимического анализа. Измерения и отбор проб были проведены в 121 точке.

Измерение твердости почв производилось в полевых условиях с помощью ручного пенетromетра Eijkelkamp на глубину до 50 см с интервалом 5 см. Средняя погрешность результатов измерений прибора составляет ±8%. Измерения производились с использованием конуса с размером поперечного сечения 1 см². В пределах каждой ячейки измерения твердости почвы производились в однократной повторности.

Измерение наблюдаемой электрической проводимости почвы (*apparent soil electrical conductivity* – EC_a) производили с помощью сенсора HI 76305 (Hanna Instruments, Woodsocket, R. I.).

Оценка целлюлозолитической активности почвы была проведена с помощью аппликационного метода [6]. В почву были заложены диски фильтровальной бумаги известного веса. Через 10 суток их достали из почвы, очистили от частичек почвы, высушили и взвесили. Процент потери веса фильтровальной бумаги стал мерой целлюлозолитической активности (%/10 суток экспозиции).

В пределах изучаемого полигона было установлено расположение пороев слепышей. В системе координат, которая начинается в левом нижнем углу полигона (ось абсцисс совпадает с направлением запад–восток, ось ординат – юг–север), было определено расположение центроидов проев слепышей, их высота и ширина основания с точностью 1 см.

В каждой ячейке полигона определялось общее проективное покрытие травостоя по визуальной шкале с градациями 0, 10, ..., 90, 100% [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Порои слепышей были охарактеризованы диаметром основания и высотой, на основании которых был вычислен их объем [3]. Морфометрическая характеристика пороев слепышей приведена в таблице 1.

Как показал дисперсионный анализ, диаметр оснований свежих и прошлогодних пороев статистически достоверно не отличается ($F = 0,88$; $p = 0,36$). Высота и объем свежих пороев статистически достоверно выше, чем в прошлогодних пороев ($F = 205,54$; $p = 0,00$ и $F = 22,11$; $p = 0,00$ соответственно).

Таблица 1

Морфометрические параметры пороев слепышей

Параметр	N	Средняя	–95%	+95%	Ст. отклонение
Старый	9	58,33	48,91	67,76	12,26
Новый	14	64,14	55,10	73,18	15,66
Всего	23	61,87	55,63	68,11	14,42
			Высота, см		
Старый	9	4,67	3,58	5,75	1,41
Новый	14	22,57	20,52	24,62	3,55
Всего	23	15,57	11,51	19,62	9,38
			Объем, см ³		
Старый	9	6806,91	3748,26	9865,56	3979,15
Новый	14	46785,45	32294,75	61276,15	25097,21
Всего	23	31141,67	19095,93	43187,42	27855,79

Высота и диаметр основания пороя слепыша линейно между собой связаны. Аналитически зависимость между высотой и диаметром основания свежего пороя имеет вид: $h = 11,27 + 0,17 d$, где h – высота пороя, d – диаметр основания пороя. Для прошлогоднего проя зависимость может быть представлена следующим образом: $h = 2,14 + 0,04 d$, где h – высота пороя, d – диаметр основания пороя.

Пространственное размещение пороев на пробном участке показано на рисунке 1.

Пространственное размещение точечных объектов может быть описано с помощью функции Рипли L [7]. Функция Рипли сравнивает распределение точечных объектов со случайным распределением точек в пределах окружности радиуса r . С помощью функции Рипли можно установить изменение характера распределения точечных объектов в зависимости от масштаба (r). Если функция $L(r)$ находится в пределах доверительного интервала, который определяет нулевой уровень, то в таком случае распределение точечных объектов является случайным, если превышает доверительный интервал – контагиозным, меньше доверительного интервала – равномерное (униформное).

Максимальный лаг при вычислении функции Рипли определяется размерами системы. Лаг разбивается на отрезки с некоторым инкрементом. В нашем случае инкремент составил 0,1 м.

Функция Рипли является эффективным средством для анализа точечных данных. Метод Монте-карло может быть применен для вычисления доверительного (95%) интервала. Таким образом, функция Рипли позволяет установить типы пространственного размещения точечных объектов и предложить гипотезы, их объясняющие.

Анализ изменения функции Рипли от масштаба свидетельствует о том, что от 0,7 м и более распределение пороев на изучаемом участке следует рассматривать как случайное (рис. 2).

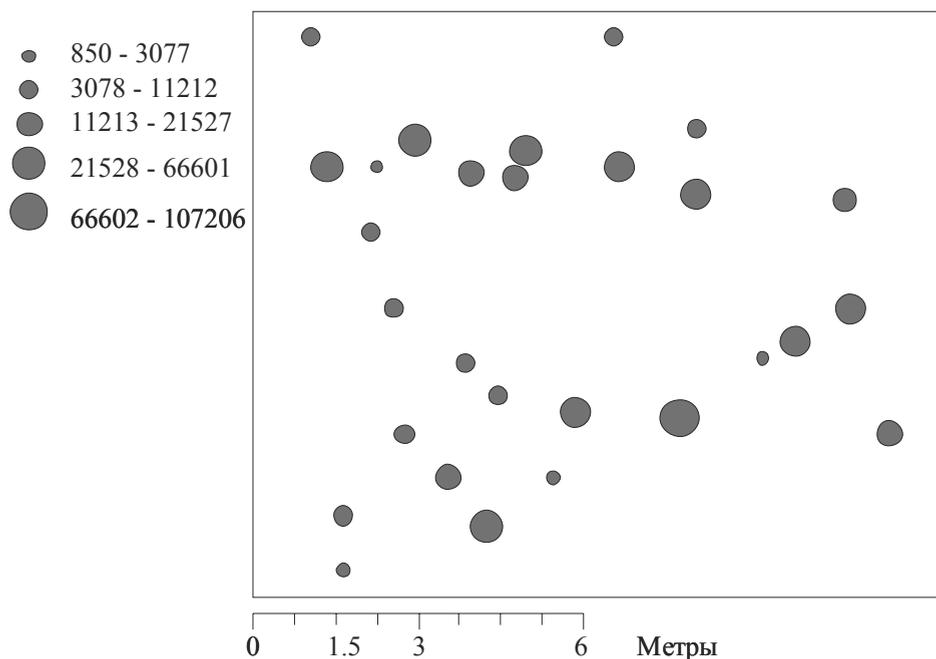


Рис. 1. Пространственное размещение пороев на пробном участке. Размер кругов показывает объем пороев (в см^3)

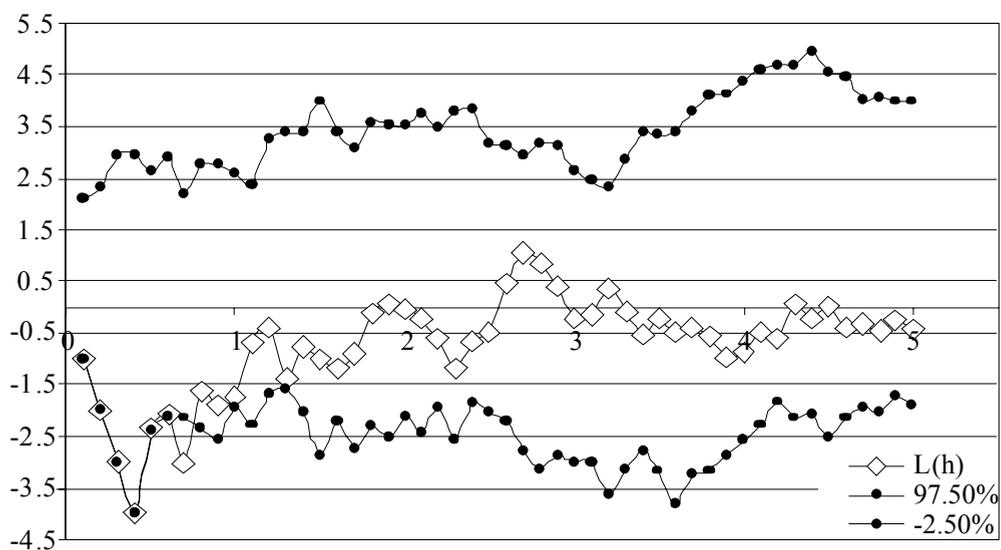


Рис. 2. Изменение $L(h)$ -функции Рипли (ось ординат) в зависимости от масштаба h (ось абсцисс, м)

В диапазоне от 0 до 0,7 распределение пороев является равномерным. Равномерное распределение предполагает наличие сил отталкивания между объектами. Очевидно, что на малых дистанциях (до 0,7 м – величина, близкая к диаметру основания пороя) наблюдается тенденция к рассредоточению пороев. С одной стороны, результат является тривиальным, с другой стороны, сама концепция функции Рипли для описания пространственного распределения пороев почвенных млекопитающих является весьма продуктивной. Эта концепция предполагает, что распределение объектов одновременно является однородным, случайным и контактирующим, а задача сводится к выявлению масштабов, в пределах которых эти типы распределения наблюдаются. Очевидно, что протяженность изучаемого полигона не позволяет установить масштаб проявления контактирующего типа распределения. Если случайное распределение принять как показатель оптимальности условий, то можно сделать вывод, что условия существования слепышей в пределах изучаемого участка однородно благоприятны.

Твердость почв была исследована до глубины 50 см с интервалом 5 см. Полученные данные свидетельствуют о том, что твердость почвы в ненарушенных педотурбационной деятельностью слепыша участках варьирует в пределах от 34,79 до 68,93 кгс/см² (табл. 2). Наименьшая твердость характерна для верхних почвенных горизонтов (0–5, 5–10 см). Наибольшая твердость характерна для горизонтов 15–20 и 20–25 см.

Педотурбационная активность слепыша приводит к статистически достоверному уменьшению твердости почвы, которое наблюдается от поверхности до глубины 25 см. По этой причине максимум твердости почвы под пороями смещен на уровень горизонтов 25–30 и 30–35 см. По классификации почв по твердости [1] изученные почвы можно отнести к весьма плотным (40–80 кгс/см²), почвы под пороями – к плотным (25–40 см²) или плотноватым (15–25 см²). Таким образом, педотурбационная деятельность слепышей приводит к значительному уменьшению твердости почв.

Таблица 2

Твердость почвы на экспериментальном участке (в кгс/см²)

Горизонт	Порой		Почва		F-статистика	p-уровень
	Средняя	Ст. отклонение	Средняя	Ст. отклонение		
0–5 см	14,88	6,48	34,79	13,00	38,19	0,00
5–10 см	24,42	19,41	52,42	18,56	33,11	0,00
10–15 см	37,68	24,40	63,07	22,86	17,85	0,00
15–20 см	48,42	26,38	68,93	24,20	10,33	0,00
20–25 см	52,50	26,88	67,10	26,25	4,53	0,04
25–30 см	53,73	24,96	62,32	26,99	1,52	0,22
30–35 см	54,27	25,29	58,94	27,22	0,44	0,51
35–40 см	52,65	26,54	55,15	25,80	0,14	0,71
40–45 см	50,43	27,00	54,90	25,35	0,45	0,50
45–50 см	49,41	26,77	57,72	24,73	1,63	0,20

Полученные характеристики почвенных образцов могут дать основу для выделения однородных участков поверхности. Для этой задачи была применена процедура нечеткой классификации с заданным числом кластеров. В качестве меры расстояния была выбрана метрика Махаланобиса. Программа *FuzMe* позволяет рассчитывать критерии качества классификации для каждого из выбранного диапазона числа кластеров – MPE (*Modified Partition Entropies*) и FPI (*Fuzzy Partitioning Index*). Минимум этих индексов позволяет обосновать объективный уровень разбиения целого на части (кластеры). Показатели качества нечеткой классификации почвенных образцов экспериментального участка представлены на рисунке 3.

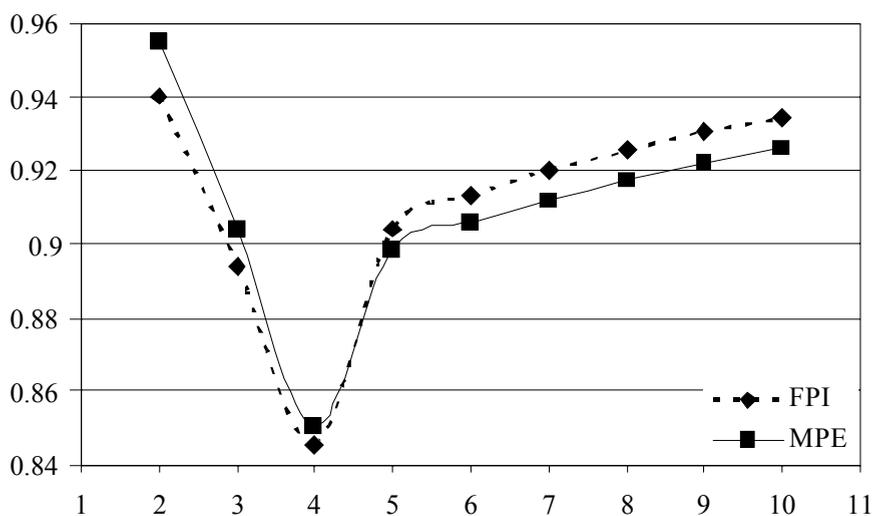


Рис. 3. Показатели качества кластерного анализа почвенных образцов по твердости в зависимости от числа кластеров

Как видно из приведенных на рисунке 4 данных, оптимальным разбиением является решение с 4 кластерами.

Статистически значимые различия между кластерами наблюдаются по твердости почвы по всем исследованным горизонтам (табл. 4).

Изменчивость средних значений твердости по горизонтам показана на рисунке 4. Наиболее сильно от всех остальных отличается кластер 3, который характеризуется наибольшей твердостью почвы, которая монотонно нарастает от поверхности до глубины 20 см, после чего практически не изменяется с глубиной. Кластеры 1, 2 и 4 различаются характером распределения твердости почвы по глубине. Для кластера 1 характерен максимум твердости на глубине 10–15 см. Для кластера 4 максимум твердости наблюдается на глубине 15–20 см. Кластер 2 отличается наличием двух максимумов – на глубине 15–20 см и на глубине 45–50 см.

Таблица 4

Дисперсионный анализ влияния разбиения образцов на кластеры на твердость почвы по горизонтам

Горизонт	<i>SS Effect</i>	<i>df Effect</i>	<i>MS Effect</i>	<i>SS Error</i>	<i>df Error</i>	<i>MS Error</i>	<i>F</i> -статистика	<i>p</i> -уровень
0–5 см	2603,87	3	867,96	22327,75	123	181,53	4,78	0,00
5–10 см	6877,91	3	2292,64	48246,95	123	392,25	5,84	0,00
10–15 см	21113,74	3	7037,91	55460,92	123	450,90	15,61	0,00
15–20 см	23532,39	3	7844,13	57653,10	123	468,72	16,74	0,00
20–25 см	36664,76	3	12221,59	53112,63	123	431,81	28,30	0,00
25–30 см	47986,22	3	15995,41	42468,63	123	345,27	46,33	0,00
30–35 см	56193,76	3	18731,25	35129,02	123	285,60	65,59	0,00
35–40 см	65282,52	3	21760,84	18636,59	123	151,52	143,62	0,00
40–45 см	64825,22	3	21608,41	17202,04	123	139,85	154,51	0,00
45–50 см	61526,02	3	20508,67	17596,92	123	143,06	143,35	0,00

Примечание к таблице: *SS Effect* – сумма квадратов эффекта, *df Effect* – степени свободы эффекта, *MS Effect* – средний квадрат эффекта, *SS Error* – сумма квадратов ошибки, *df Error* – степени свободы ошибки, *MS Error* – средний квадрат ошибки.

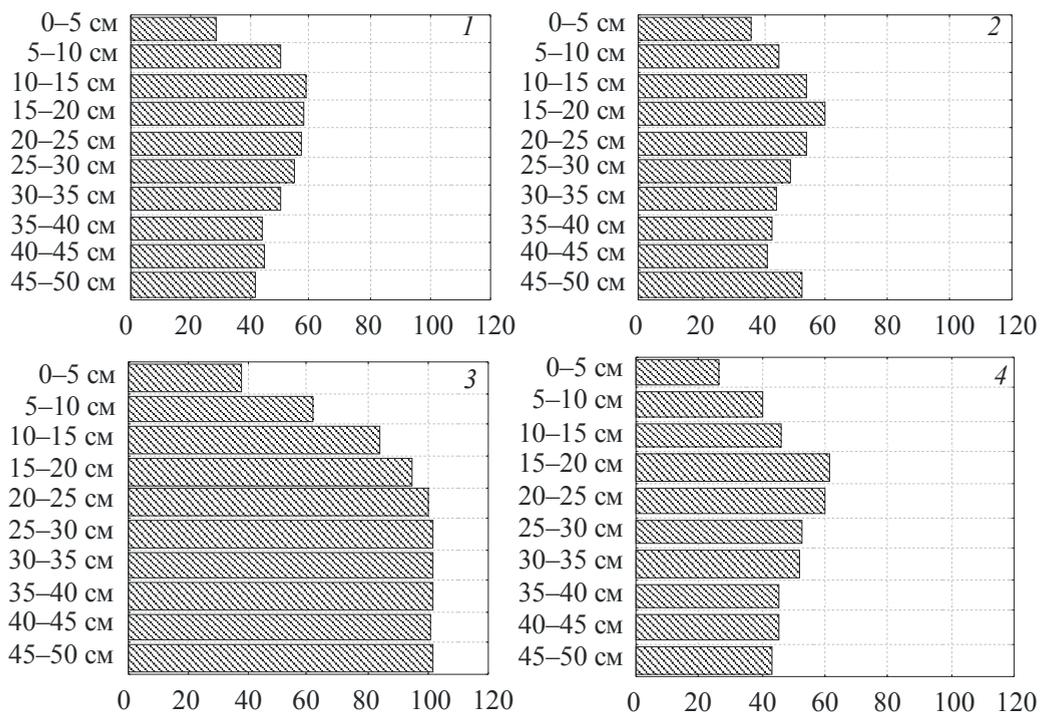


Рис. 4. Изменчивость твердости по профилю почвы для кластерных групп (в кг/см²)

Таким образом, почва на изученном участке может быть разделена на две большие группы: слитая с высокой твердостью почвы (около 100 кгс/см² на глубине больше 20 см) и весьма плотная (40–60 кгс/см²). Последняя группа может быть дифференцирована на три варианта, которые отличаются характером изменчивости твердости по профилю.

Пространственное размещение кластеров по изученной территории показано на рисунке 5. Кластер 3 с максимальной твердостью почвы занимает наибольшую площадь участка – 29,69% (табл. 5).

Таблица 5

Распределение пороев по почвенным группировкам (кластерам)

Кластер	Доля от суммарной площади	Число пороев (x_i)	Число пороев при независимом распределении (x_e)	$(x_i - x_e)^2 / x_e$
1	0,24	4,00	6,36	0,87
2	0,27	6,00	6,90	0,12
3	0,30	3,00	7,72	2,88
4	0,19	13,00	5,02	12,67
Всего	1,00	26,00	26,00	16,55

В пределах территории, занимаемой кластером 3, было отмечено только 3 пороя из 26. Кластер 1 занимает 24,45% территории участка, кластер 2 – 26,56%, а кластер 4 – 19,91%. Наибольшее количество пороев при минимальной занимаемой площади отмечено для кластера 4. Гипотезу о независимом распределении пороев от кластерной структуры почвенного покрова следует отвергнуть (статистика $\chi^2 = 16,55$ при граничном значении для двух степеней свободы и $\alpha = 0,05$ равно 5,99). Таким образом, либо слепыши избегают почвы с высокой степенью твердости, либо педотурбационная деятельность этих животных приводит к формированию мозаичности почвенного покрова в отношении его механической твердости. Наиболее вероятным является взаимосвязь указанных обстоятельств.

Дискриминантный анализ позволил подтвердить значительную обособленность между кластерами, выделенными по твердости почв (рис. 6). По канонической переменной 1 сильно отличается от всех прочих кластер 3, который соответствует участку почвы с высокой твердостью. Кластеры 1, 2 и 4 образуют облако точек, между которыми уже нет дискретных различий, однако наблюдается плавный переход. Каноническая переменная 2 дифференцирует кластер 2 от кластеров 1 и 4, а каноническая переменная 3 (не показана) – кластер 1 и 4.

Дискриминантный анализ позволил установить показатели, по которым происходит дифференциация выделенных почвенных кластеров (табл. 6).

Кластер 3 отличается от всех прочих повышенной твердостью почвы, которая увеличивается с глубиной, о чем свидетельствуют коэффициенты корреляции между данными по твердости и каноническим корнем 1. Кроме того, этот кластер практически не реагирует на изменчивость целлюлозолитической активности и электропроводности на глубине почвы 0–10 см и свойства напочвенного яруса – проективное покрытие, количество пороев и удаленность от центра пороя. Таким образом, кластер 3 – это участки почвы, которые не испытали педотурбационной активности слепышей.

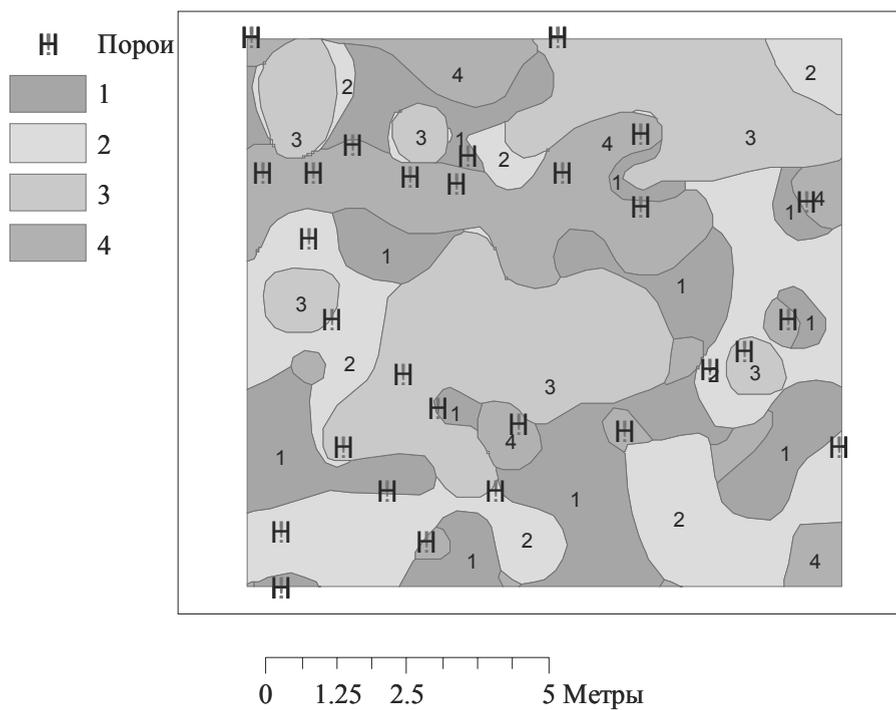


Рис. 5. Пространственное размещение кластеров, выделенных на основании твердости почвы.

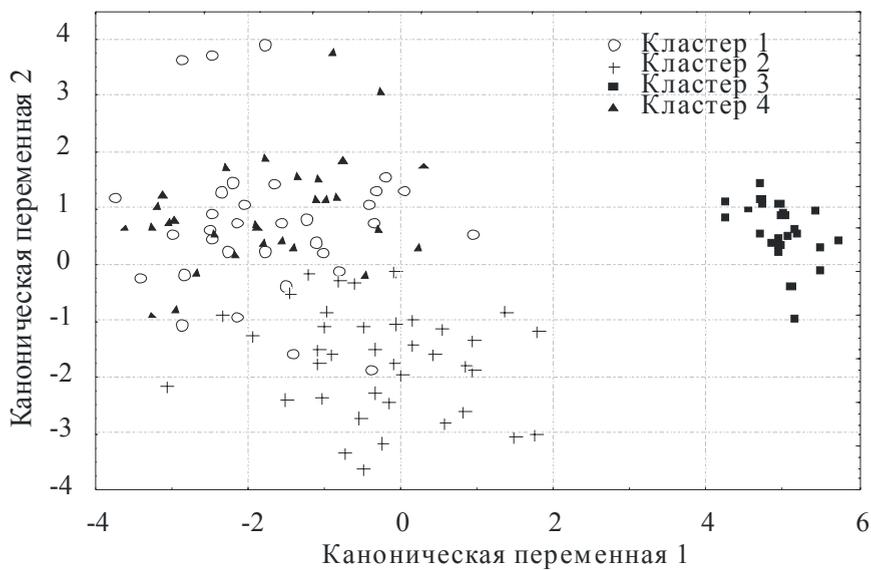


Рис. 6. Расположение почвенных образцов в пространстве первых двух канонических переменных

Кластеры 1, 2 и 4 можно рассматривать как почвенные участки, которые испытали педотурбационную активность слепышей на разных этапах. Зоной активной роющей деятельности этих животных является кластер 4, зоной затухающих последствий педотурбаций, которые имели место в недалеком прошлом (прошлогодние порои) – кластер 1 и зоной стабилизации (порои 2 летние и старше) – кластер 2.

В дифференциации участков, которые находятся на разных этапах педотурбационной активности (кластеры 1, 2 и 4) важную роль начинают играть свойства верхних почвенного горизонтов и напочвенного яруса. В наибольшей степени педотурбационные эффекты манифестируют в зоне кластера 4, меньше – в зоне кластера 1 и практически отсутствуют в области кластера 2.

Таблица 6

Коэффициенты корреляции между переменными и каноническими корнями

Переменные	Канонический корень 1	Канонический корень 2	Канонический корень 3
Твердость почвы в горизонте			
0–5 см	0,11	–0,18	–0,08
5–10 см	0,13	0,06	–0,22
10–15 см	0,22	0,10	–0,28
15–20 см	0,24	0,15	0,05
20–25 см	0,31	0,27	0,04
25–30 см	0,39	0,33	–0,09
30–35 см	0,46	0,44	0,01
35–40 см	0,71	0,48	0,01
40–45 см	0,73	0,55	–0,02
45–50 см	0,74	0,11	0,06
Свойства почвы на глубине 0–10 см			
Целлюлозолитическая активность	–0,06	0,07	–0,10
Электрическая проводимость	0,00	0,03	–0,15
Свойства напочвенного яруса			
Проективное покрытие растительности	0,05	–0,10	–0,31
Мощность почвенных выбросов	–0,05	0,21	0,56
Дистанция от центра пора	0,01	–0,20	–0,25

Таким образом, значительный период затухания последствий, вызванных педотурбационной активностью слепышей, приводит к формированию обширной экологической зоны, которая несет на себе отпечаток деятельности почвенных

млекопитающих. Зоогенные флуктуации затрагивают физические и биологические свойства почвы, в результате чего формируется пестрота почвенного покрова степных участков.

ВЫВОДЫ

1. Применение функции Рипли является эффективным инструментом описания характера пространственного распределения пороев млекопитающих. В пределах изученного полигона распределение пороев в диапазоне от 0 до 0,7 м является однородным, при превышении 0,7 м распределение становится случайным.

2. Педотурбационная активность слепыша приводит к статистически достоверному уменьшению твердости почвы, которое наблюдается от поверхности до глубины 25 см.

3. Роющая деятельность слепышей является важным фактором формирования мозичности почвенного покрова, что проявляется как на уровне физических, так и биологических свойств.

Список литературы

1. Бахтин П. У. Исследования физико-механических и технологических свойств основных типов почв СССР / П. У. Бахтин. – М., 1969. – 184 с.
2. Воронов А. Г. Геоботаника / А. Г. Воронов. – М.: Высшая школа, 1973. – 384 с.
3. Пахомов А. Е. Биогеоэкологическая роль млекопитающих в почвообразовательных процессах степных лесов Украины. – Т. 2. Трофический тип воздействия. Биотехнологический процесс становления экологической устойчивости эдафотопы / А. Е. Пахомов. – Днепропетровск: ДГУ, 1998. – 216 с.
4. Пахомов А. Е. Положительное и отрицательное влияние экологического инжиниринга: сравнение парадигм / А. Е. Пахомов, А. В. Жуков // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. – Д. – Сер. Біологія. Екологія. – 2004. – № 1. – С. 141–146.
5. Jones C. G. Organisms as ecosystem engineers / C. G. Jones, J. H. Lawton, M. Shachak // Oikos. – 1994. – Vol. 69. – P. 373–386.
6. Latter P. M. Harrison A. F. Decomposition of cellulose in relation to soil properties and plant growth / P. M. Latter, A. F. Harrison // Cotton strip assay: an index of decomposition in soils. Grange-over-Sands [Harrison, A. F.; Latter, P. M.; Walton, D. W. H., (eds.)], NERC/ITE. – 1988. – P. 68–71.
7. Ripley B. D. The second-order analysis of stationary point processes / B. D. Ripley // Journal of Applied Probability – 1976. – Vol. 13. – P. 255–266.

Пахомов О. Є., Кунах О. М., Коновалова Т. М., Жуков О. В. Просторова організація системи поривів сліпаків *Spalax microphthalmus* // Екосистеми, їх оптимізація та охорона. Сімферополь: ТНУ, 2010. Вип. 2. С. 106–117.

В роботі наведено результати вивчення впливу риучої діяльності сліпака на просторову неоднорідність ґрунту. Показано ефективність ГІС-технологій для оцінки впливу педотурбаційної активності на створення гетерогенності ґрунтового покриву. Одержані результати, які свідчать про те, що застосування функції Ріплі є ефективним інструментом описання характеру просторового розподілу поривів ссавців. Встановлено, що у межах досліджуваного полігону розподіл поривів у діапазоні від 0 до 0,7 м є однорідним, при перевищенні 0,7 м розподіл стає випадковим. Наведені свідчення того, що риуча діяльність сліпаків є важливим фактором формування мозаїчності ґрунтового покриву.

Ключові слова: педотурбаційна активність, порії, твердість ґрунту, функція Ріплі.

Pachomov A. Y., Kunach O. N., Konovalova T. M., Zhukov A. V. The spatial organization of the mound system of the mole rats *Spalax microphthalmus* // Optimization and Protection of Ecosystems. Simferopol: TNU, 2010. Iss. 2. P. 106–117.

The results of the investigation of the digging activity effect of the mole rats on the soil spatial heterogeneity have been presented. The GIS-technology has been shown as being effective instrument for assessment of the pedoturbation activity influence for creation of the heterogeneity of the soil cover. The mammalian mound spatial distribution has been revealed to be explained effectively by means of Ripley function. It has been found that within investigated polygon the mound distribution is uniform within the scale from 0 to 0,7 m. If scale is more than 0,7 m the distribution is random. The digging activity of the mole rats has been proofed as important factor of the mosaic structure formation of the soil cover.

Key words: pedoturbation activity, mounds, soil mechanical impedance, Ripley function

Поступила в редакцию 25.10.2010 г.