

УДК 574.5:634.9

А. Е. Пахомов, Т. М. Коновалова, А. В. Жуков

*Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара  
Днепропетровский государственный аграрный университет*

**ГИС-ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЧВЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ  
ПЕДОТУРБАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ СЛЕПЬША  
(*SPALAX MICROPHTHALMUS*)**

Изучено влияние роющей активности слепьша на электропроводность почв. Показана эффективность ГИС-технологий для оценки воздействия педотурбационной активности на создание гетерогенности почвенной поверхности. Предложен метод преобразования одномерного пространственно координированного массива данных в матричную форму для дальнейшей обработки методами многомерной статистики. Характеристика поверхности почвы в области порев слепьша с помощью ландшафтных показателей сложности и разнообразия позволила количественно оценить роль роющей активности слепьша в создании разнообразия условий на уровне нанорельефа.

О. С. Пахомов, Т. М. Коновалова, О. В. Жуков

*Дніпропетровський національний університет ім. Олеса Гончара  
Дніпропетровський державний аграрний університет*

**ГИС-ПІДХІД ДО ОЦІНКИ МІНЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ  
ҐРУНТУ ПІД ВПЛИВОМ ПЕДОТУРБАЦІЙНОЇ АКТИВНОСТІ  
СЛІПАКА (*SPALAX MICROPHTHALMUS*)**

Вивчено вплив рийної активності сліпака на електропровідність ґрунтів. Показано ефективність ГІС-технологій для оцінки впливу педотурбаційної активності на створення гетерогенності ґрунтової поверхні. Запропоновано метод перетворення одновимірного просторово координованого масиву даних у матричну форму для подальшої обробки методами багатовимірної статистики. Характеристика ґрунту в межах поривів сліпака за допомогою ландшафтних показників складності та різноманіття дозволила кількісно оцінити роль рийної активності сліпака в утворенні різноманіття умов на рівні нанорельєфу.

T. M. Konovalova, A. V. Zhukov, A. Y. Pakhomov

*Oles' Honchar Dnipropetrovsk National University  
Dnipropetrovsk State Agrarian University*

**GIS-APPROACH FOR VARIABILITY ASSESSMENT  
OF SOIL ELECTRIC CONDUCTIVITY UNDER PEDOTURBATION  
ACTIVITY OF MOLE RAT (*SPALAX MICROPHTHALMUS*)**

The results of the investigation of the impact of the mole rat's activity on soil electric conductivity have been presented. GIS-technology have been shown to be effective for assessment of the pedoturbation activity effect on the soil surface heterogeneity formation. Method of the one-dimension spatial coordinated array transformation into matrix form has been proposed for following multidimension statistic analysis

application. The quantity estimation of the mole rats role in formation of the habitat nanorelief-level diversity has been obtained by means of indexes of the landscape complexity and diversity.

### Введение

Активность млекопитающих-почвороев является важным биогеоценотическим фактором, влияющим на различные аспекты функционирования экосистем степной зоны Украины и процессы почвообразования [4]. Формирование пространственной гетерогенности свойств почвы можно рассматривать как существенный итог педотурбационной активности микромаммалий [5]. Использование ГИС-технологий – эффективное средство изучения пространственно координированных процессов. Однако применение данного подхода требует большого количества данных и, соответственно, значительных трудозатрат для описания пространственных взаимодействий. Поэтому применение методов экспресс-оценки дополнительных почвенных свойств является условием применения ГИС-технологий в экологических исследованиях. К числу таких свойств относится электропроводность почвы.

Электропроводность почв зависит от содержания влаги, концентрации солей, содержания воздуха и температуры. При влажности, соответствующей капиллярной влагоемкости, когда дополнительное увлажнение слабо сказывается на изменении проводимости, величину электропроводности можно использовать как физическую характеристику, выявляющую особенности почвенных типов и их горизонтов [2].

Определить электрическую проводимость почв можно с помощью трех основных методик, для проведения которых необходимо получение водной вытяжки из образца: 1) метод оценки электропроводности в суспензии в соотношении 1 : 2 субстрата к воде [10]; 2) метод насыщенного экстракта [11]; 3) метод промывного экстрагирования [6]. Первые два подхода используются для проведения анализов в лабораторных условиях. Метод промывного экстрагирования разработан как быстрый и недорогой тест, который может быть проведен в полевых условиях. Несмотря на это, даже для промывного метода необходимо проведение сбора большого количества образцов. Измерения *in situ* не требуют получения вытяжки из почвенных образцов, поэтому они являются экспресс-способом обследования почв. В последние годы разработаны тестеры, которые непосредственно вводятся в почву для измерения ее электропроводности – исследования *in situ* [9]. В связи с этим цель данной работы – оценить возможности применения ГИС-подхода для оценки изменчивости электропроводности почвы на примере педотурбационной активности слепыша (*Spalax microphthalmus*).

### Материал и методы исследований

Для измерения электропроводности почвы *in situ* создан ряд приборов, к числу которых относится сенсор HI 76305 (Hanna Instruments, Woodsocket, R. I.). Этот сенсор работает совместно с портативным прибором HI 993310. Тестер оценивает общую электропроводность почвы, то есть объединенную проводимость почвенного воздуха, воды и частиц. Результаты измерений прибора представлены в единицах насыщенности почвенного раствора солями (г/л). Однако нет однозначной связи между насыщенностью почвенного раствора солями и электропроводностью. Коэффициент перевода единиц электропроводности (дС/м) в единицы солености (мг/л) варьирует: 1 дС/м = 640–700 мг/л. Это зависит от качественного состава растворенных солей [8; 12]. Неоднозначность перевода единиц измерения прибора HI 76305 в единицы электропроводности делает возможным использование только единиц солености – г/л.

Результаты измерений электропроводности прибором HI 76305 сильно зависят от температуры почвы. Изменение температуры от +10 до +38 °С приводит к более чем

двукратному изменению показаний прибора [9]. Поэтому для получения сравнимых результатов измерения этим прибором должны проводиться при одинаковой температуре.

Исследования проведены в байраке Яцев Яр 01.04.2010 г. Урочище Яцев Яр относится к байрачным лесам южного географического варианта [1], находится вблизи с. Перше Травня (Днепропетровский р-н) ( $48^{\circ}19'39,89''$  СШ и  $35^{\circ}10'55,17''$  ВД). Общая протяженность байрака с запада на восток – около 5,2 км, устье упирается в р. Днепр. Порои слепышей находились в верхней трети склона южной экспозиции. Местообитание представляет собой степную целинку. Исследованы свежий порой текущего года и прошлогодний.

Измеряли электропроводность почвы в точках, находящихся в узлах квадратной сетки  $11 \times 11$  с шагом 0,1 м. Сетка формирует систему координат. «Левый нижний» угол является началом координат (0; 0), «крайний правый» угол имеет координаты (10; 10). Сетка расположена так, что ось абсцисс направлена с востока на запад, а ординат – с севера на юг; геометрический центр пороя слепыша имеет координаты (5; 5), то есть совпадает с центром координатной сетки. Измерение электропроводности проводили с помощью зонда на глубине 3–5 см от поверхности почвы (вне пороя) и 3–7 см (в пределах пороя). Это связано с тем, что рыхлый субстрат пороя на небольшой глубине не плотно контактирует с зондом, и прибор показывает нулевой результат.

### Результаты и их обсуждение

Порой текущего года представляет собой выброс почвы на поверхность в виде плосковершинной пирамиды высотой 15–16 и диаметром 50–55 см (рис. 1). Основание пороя имеет форму неправильной окружности. Материал, из которого состоит порой, представляет собой лессовидный суглинок темно-желтого цвета рыхлой комковатой структуры. Центральная часть пороя (кратер) характеризуется более рыхлым сложением, чем бруствер, ее окружающий. Это различие заметно при исследовании пороя зондом, внешне такого различия не наблюдается.

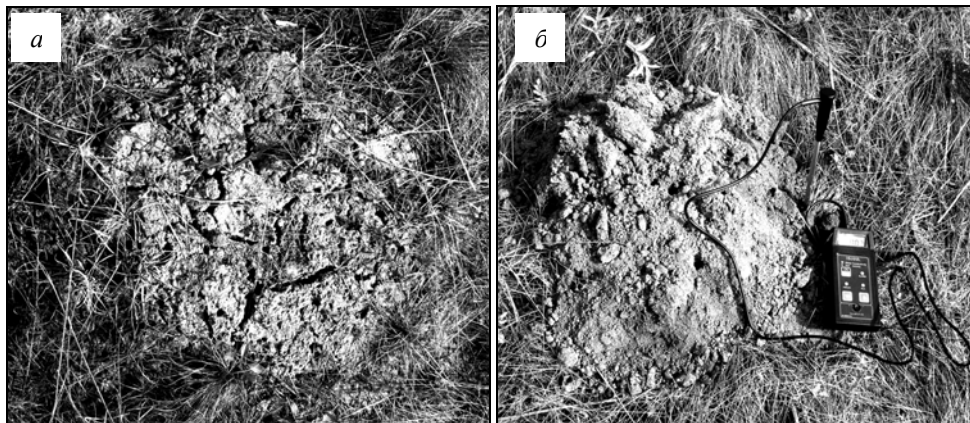


Рис. 1. Порои слепышей: *а* – свежий, *б* – прошлогодний

Прошлогодний порой представляет собой слой суглинка, который незначительно возвышается над поверхностью почвы (3–5 см) и в основании имеет форму правильного круга диаметром 57–60 см. Поверхность пороя имеет значительные трещины. Внешне и при зондировании материал имеет плотную однородную структуру. Различий между кратером и бруствером не наблюдается. Статистически электропроводность на пороях слепышей не может быть описана нормальным распределением (рис. 2).

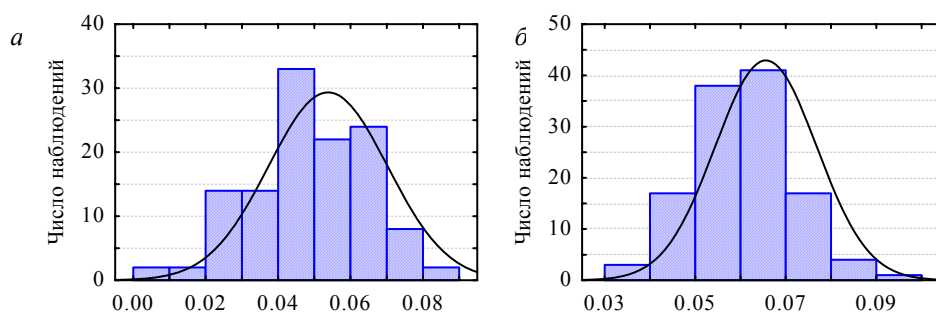


Рис. 2. Распределение электропроводности (г/л) на пороях слепышей:  
а – свежий, б – прошлогодний

Критерий Колмогорова–Смирнова для электропроводности почвы на свежих пороях равен 0,14, а вероятность ошибочно принять это распределение как нормальное составляет  $p < 0,05$ . Для прошлогодних пороев этот показатель равен 0,17 при вероятности ошибки  $p < 0,01$ . Критерий Шапиро–Уилкса также позволяет отвергнуть нулевую гипотезу о нормальном характере распределения случайных величин ( $W = 0,96$ ,  $p < 0,001$  для свежих и  $W = 0,93$ ,  $p < 0,001$  для прошлогодних пороев). Величина описывается нормальным распределением, если на нее действует множество случайных помех. Отклонение от нормального распределения возникает под действием одного или нескольких факторов. Таким образом, отклонение распределения электропроводности почвы на пороях от случайного можно рассматривать как проявление структурирующего воздействия педотурбационной активности слепышей на почвенный покров.

Свежие порою отличаются от прошлогодних пониженным уровнем электрической проводимости почвы (табл. 1). Для свежих пороев этот показатель находится на уровне 0,05, а для прошлогодних – 0,07 г/л (различия достоверны по критерию Вилкоксона  $W = 5,68$ ,  $p < 0,001$ ). Свежий порою характеризуется большей изменчивостью электропроводности (стандартное отклонение – 0,02, диапазон колебаний показателя – 0,01–0,09 для свежих против 0,01 и 0,04–0,10 для прошлогодних пороев). Для свежих пороев наблюдается асимметричный двугорбый характер распределения электропроводности (асимметрия – 0,24, эксцесс – 0,22), что соответствует преобладанию меньшего (левого) пика.

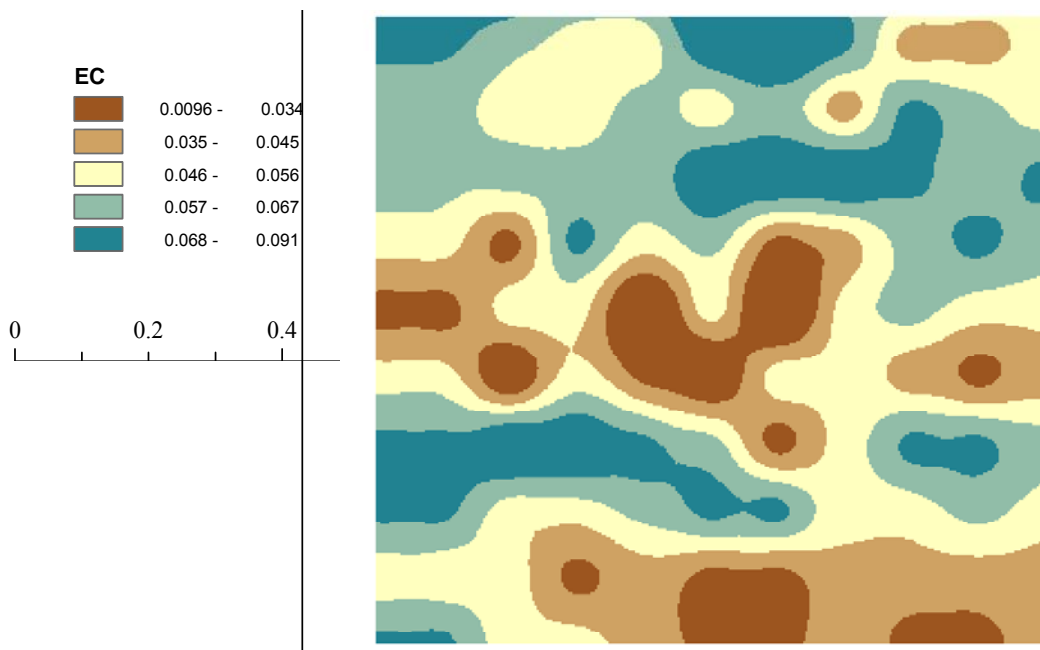
Распределение электропроводности на старых пороях также асимметрично, но со сдвигом влево (асимметрия – +0,18) и положительным эксцессом (0,15), что отражает «заостренный» пик распределения. Такой характер зависимости характеризует направленное увеличение электропроводности почвы под действием роющей активности слепышей.

Таблица 1

Электропроводность почвы на пороях слепышей

Порою	N	Среднее, г/л	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Асимметрия	Эксцесс
Свежий	121	0,05	0,05	0,01	0,09	0,02	-0,24	-0,22
Прошлого года	121	0,07	0,07	0,04	0,10	0,01	0,18	0,15

Педотурбационная активность слепыша нарушает однородное (в выбранном масштабе) распределение почвенных свойств и приводит к формированию закономерной пространственной структуры (рис. 3, 4). В области кратера порою (центральная часть рисунка) наблюдается область пониженной электропроводности почвы, которая окружена концентрической областью повышенной электропроводности.



**Рис. 3. Пространственная изменчивость электропроводности почвы (ЕС) в области свежего пороя слепыша**

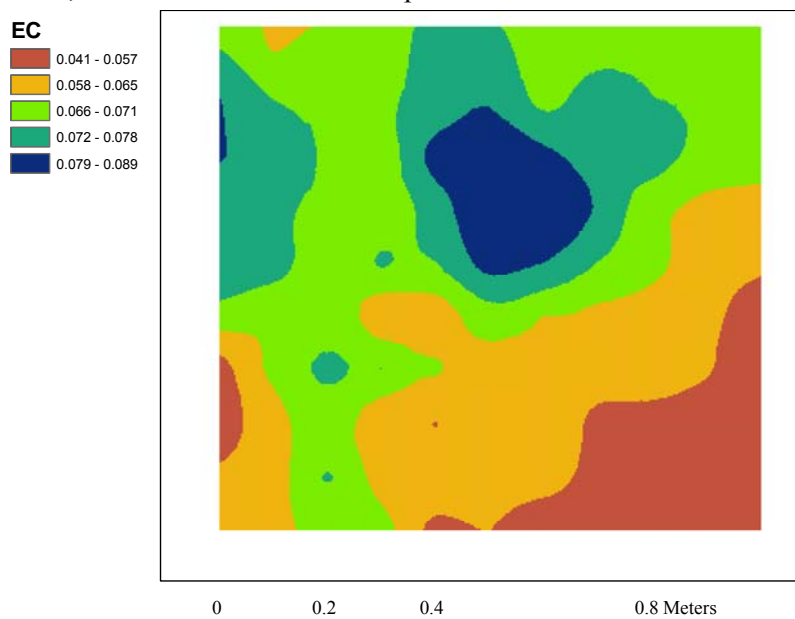
Для прошлогодних пороев характерно более выровненное распределение электропроводности почвенного покрова (рис. 4). В центральной части схемы, которая соответствует кратеру пороя, находится область остаточного увеличения уровня электропроводности. По мере удаления от геометрического центра пороя происходит снижение электропроводности до фонового уровня.

Визуальная оценка последствий педотурбационной активности приводит к мысли об увеличении пестроты почвенного покрова в области пороев слепышей. Количественная оценка пестроты покрова может быть проведена после выделения относительно однородных по своим свойствам участков – локусов. Процедура анализа может быть аналогичной той, при которой производится оценка разнообразия географической структуры единиц более высокого ранга – ландшафтов. В таком случае аналогами локусов выступают урочища в пределах ландшафта.

Для выполнения задачи классификации географического пространства используют алгоритмы кластерного анализа, при котором каждую точку пространства описывают с помощью ряда переменных, то есть речь идет о многомерном отражении свойств изучаемого объекта. В нашей работе свойства почвенного покрова описываются с помощью одномерного массива данных – показаний электропроводности почвы. Наиболее простой способ классификации в данной ситуации – выделение классов объектов по уровням этого признака. Однако такой подход является статистическим и не учитывает пространственного аспекта изменчивости признака. Поэтому необходимо на основании имеющегося одномерного массива данных сгенерировать многомерную метрику, которая бы учитывала пространственную компоненту изменчивости.

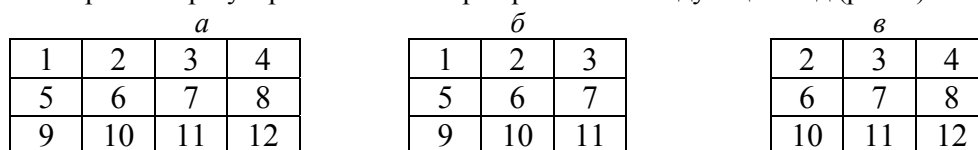
В работе В. М. Ефимова и соавт. [3] приведен алгоритм преобразования временного одномерного ряда данных в многомерную матрицу, которая в дальнейшем может быть обработана средствами анализа главных компонент. Эта процедура может быть распространена на преобразование одномерного пространственно упорядоченного

массива данных в матричную форму. Предложенная процедура основывается на описании свойств данной точки не только по данным электропроводности, которые были получены в ней, но и по показаниям в ее окрестности.



**Рис. 4. Пространственная изменчивость электропроводности почвы (ЕС) в области прошлогоднего пороя слепыша**

Фрагмент регулярной сетки отбора проб имеет следующий вид (рис. 5).



**Рис. 5. Фрагменты регулярной сетки отбора проб, где цифрами показаны маркеры (номера) ячеек**

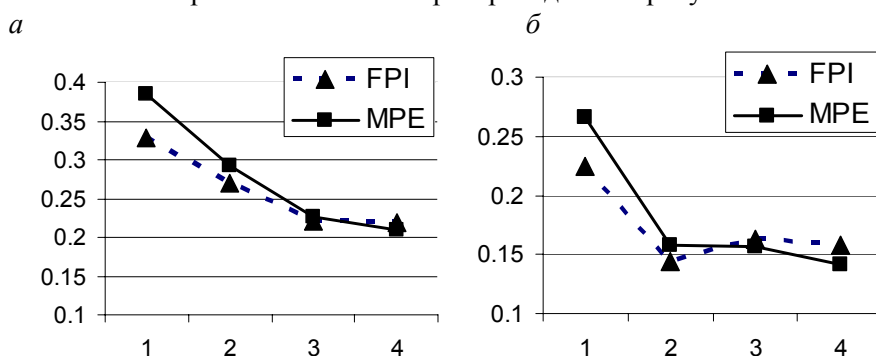
Одномерный массив данных (*a*), который описывает эту сетку, может быть представлен как (1, 2, 3, ..., 12). Описанием свойств ячейки 6, которые учитывают закономерности пространственной изменчивости признака в ее окрестности, будут числа, находящиеся в ячейках.

Таким образом, вектор, который характеризует ячейку 6, имеет вид (*b*): (6, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 10, 11). Ячейку 7 будут характеризовать числа в ячейках (*c*): (7, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 12). Таким образом, при смещении вдоль направлений регулярной сетки изменяется индексирование характеристических ячеек, но их взаимное расположение остается неизменным. В результате может быть получена матрица размером  $9 \times N$ , где  $N$  – число анализируемых точек.

Для описания свойств точки необходимо, чтобы она имела окружение из других точек во всех направлениях, чего нет у краевых точек. Можно для формирования матрицы использовать все точки, кроме краевых. Тогда это сильно сокращает объем данных. Либо значения искомого параметра могут быть экстраполированы в область ближайшего окружения изучаемого пространства, что позволит дать векторное описание всех точек пространства.

Полученная описанным способом матрица обработана средствами многомерного факторного анализа. Для пороев текущего года 9-мерное пространство может быть отображено в 3-мерном пространстве факторов (68,2 % суммарной дисперсии), собственные числа которых превышают единицу. Для прошлогодних пороев отображение может быть осуществлено в 2-мерном пространстве (58,2 % суммарной дисперсии). Только эта особенность уже подчеркивает более сложный характер пространственной изменчивости электропроводности почв в области свежих пороев слепышей.

Факторные веса использованы в качестве переменных для кластерного анализа. Для этого применена программа FuzME [7], в основе работы которой лежит алгоритм нечеткой классификации и в качестве меры расстояния между объектами используется 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). Статистики качества разбиения на кластеры приведены на рисунке 6.



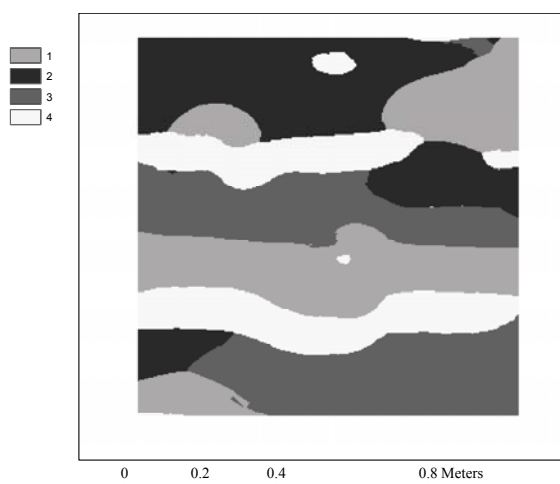
**Рис. 6. Показатели качества классификации поверхности почвы по электропроводности в области пороев слепыша: а – свежие, б – прошлогодние порою;** цифры по оси абсцисс – порядок разбиения (1 – два кластера, 2 – три и т. д.).

При разбиении поверхности почвы по критерию электропроводности в области свежих пороев слепыша целесообразно остановиться на четырех кластерах (локусах), а в области прошлогодних пороев – на трех кластерах (локусах). Пространственное расположение локусов представлено на рисунках 7 и 8. Организация пространства, дифференцированного на относительно однородные локусы, может быть количественно оценена с помощью ряда ландшафтных индексов. К их числу можно отнести ландшафтный индекс формы (Landscape Shape Index – LSI), среднюю фрактальную размерность и индекс разнообразия Шеннона. Эти и целый ряд других метрик могут быть рассчитаны с помощью программы Fragstat (программа, а также формулы расчета индексов – см. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>). Оценка индексов разнообразия поверхности почвы по электропроводности в области пороев слепыша приведена в таблице 2.

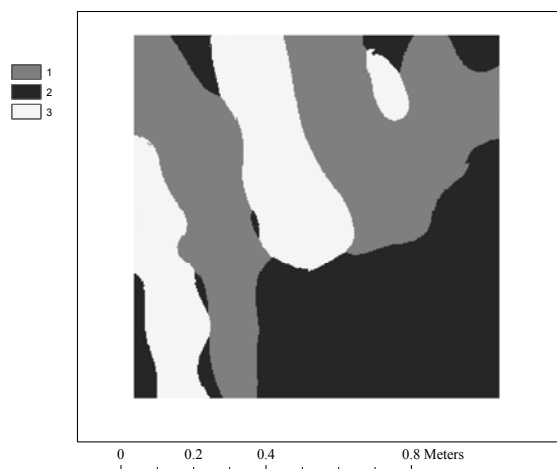
Таблица 2

**Метрики разнообразия поверхности почвенного покрова**

Порой	Ландшафтный индекс формы	Средняя фрактальная размерность	Индекс Шеннона
Свежий	3,35	0,74	1,37
Прошлого года	2,65	0,72	1,08



**Рис. 7. Пространственная структура локусов электропроводности почвенного покрова в области свежих пороев слепыша**



**Рис. 8. Пространственная структура локусов электропроводности почвенного покрова в области прошлогодних пороев слепыша**

Анализ таблицы 2 приводит к выводу о том, что окрестности свежих пороев характеризуются значительно более высоким уровнем показателей ландшафтного разнообразия. Ландшафтный индекс формы в свежих пороях превышает в 1,26 раза аналогичный показатель в прошлогодних пороях. Фрактальная размерность указывает на большую «сглаженность» формы отдельных локусов в прошлогодних пороях в сравнении со свежими. Значение индекса Шеннона имеет смысл только в пределах изучаемой рамки отбора проб и указывает на более высокий уровень разнообразия локусной организации в свежих пороях, что связано с большим числом локусов.

### **Выводы**

Изучение электропроводности позволяет применить для изучения характера влияния педотурбационной деятельности слепыша методы геостатистического анализа. Роющая активность слепыша является важным фактором формирования мозаичности и разнообразия экологических условий почвенного покрова. С течением времени педотурбационная неоднородность почвенного покрова в области пороев снижается, однако этот процесс занимает достаточно длительный период, измеряющийся годами.



## Библиографические ссылки

1. **Бельгард А. Л.** Степное лесоведение. – М. : Лесная промышленность, 1971. – 336 с.
2. **Вадюнина А. Ф.** Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М. : Агропромиздат, 1986. – 416 с.
3. **Ефимов В. М.** Анализ временных рядов методом главных компонент / В. М. Ефимов, Ю. К. Галактионов, Н. Ф. Шушпанова. – Новосибирск : Наука, 1988. – 71 с.
4. **Пахомов А. Е.** Биогеоценотическая роль млекопитающих в почвообразовательных процессах степных лесов Украины. – Т. 2. Трофический тип воздействия. Биотехнологический процесс становления экологической устойчивости эдафотопы. – Д. : ДГУ, 1998. – 216 с.
5. **Пахомов А. Е.** Положительное и отрицательное влияние экологического инжиниринга: сравнение парадигм / А. Е. Пахомов, А. В. Жуков // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Біологія. Екологія. – 2004. – № 1. – С. 141–146.
6. **Cavins J. T.** Establishment of calibration curves for comparing pourthrough and saturated media extract nutrient values / J. T. Cavins, B. E. Whipker, W. C. Fonteno // HortScience – 2004. – Vol. 39. – P. 1635–1639.
7. **Pennisi B. V.** 3 ways to measure medium EC / B. V. Pennisi, M. W. van Iersel // GMPro. – 2002. – Vol. 22, N 1. – P. 46–48.
8. **Scoggins H. L.** *In situ* probes for measurement of EC of soil-less substrates: Effects of temperature and substrate moisture content / H. L. Scoggins, M. W. van Iersel // HortScience. – 2006. – Vol. 41. – P. 210–214.
9. **Sonneveld C.** Estimating quantities of water-soluble nutrients in soil using a specific 1:2 volume extract // Commun. Soil Sci. Plant Anal. – 1990. – Vol. 21. – P. 1257–1265.
10. **Warncke D. D.** Analyzing greenhouse growth media by the saturation extraction method // HortScience. – 1986. – Vol. 21. – P. 223–225.
11. **Whipker B. E.** Electrical conductivity (EC): Units and conversions / B. E. Whipker, T. J. Cavins // <http://www.ces.ncsu.edu/depts/hort/floriculture/Florex/EC%20Conversion.pdf>

Надійшла до редколегії 20.06.2010