

УДК 574.4:504.054

А. В. Жуков¹, Т. М. Коновалова²

¹*Дніпропетровський державний аграрний університет*

²*Дніпропетровський національний університет ім. Олеса Гончара*

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЧВЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ РОЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ СЛЕПЫШЕЙ НА РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ

Почвенные выбросы слепышей характеризуются меньшей электрической проводимостью, чем окружающая порой почва, в связи с изменением плотности почвы и влажности по сравнению с ненарушенной почвой. Масштаб влияния роющей активности слепышей на электропроводность почвы не ограничивается геометрическими границами пороев. Порой окружены ореолом радиусом 1,0–1,5 м, который характеризуется повышенной электрической проводимостью почвы. Размер ореола увеличивается с возрастом пороев и при более агрегированном их взаимном расположении.

О. В. Жуков¹, Т. М. Коновалова²

¹*Дніпропетровський державний аграрний університет*

²*Дніпропетровський національний університет ім. Олеса Гончара*

ПРОСТОРОВА МІНЛИВІСТЬ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ҐРУНТУ ПІД ВПЛИВОМ РИЙНОЇ АКТИВНОСТІ СЛІПАКІВ НА РІЗНИХ МАСШТАБНИХ РІВНЯХ

Ґрунтові викиди сліпаків характеризуються меншою електричною провідністю, ніж навколишній ґрунт, у зв'язку зі зміною питомої щільності ґрунту та вологості порівняно з не порушеним ґрунтом. Масштаб впливу рийної активності сліпаків на електропровідність ґрунту не обмежується геометричними межами поривів. Порив оточений ореолом радіусом 1,0–1,5 м, який характеризується підвищеною електричною провідністю ґрунту. Розмір ореола збільшується з віком поривів і при більш агрегованому їх взаємному розташуванні.

A. V. Zhukov¹, T. M. Konovalova²

¹*Dnipropetrovsk State Agrarian University*

²*Oles' Gonchar Dnipropetrovsk National University*

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY UNDER THE MOLE RATS (*SPALAX MICROPHTHALMUS*) DIGGING ACTIVITY AT THE DIFFERENT SCALES

The soil mounds emerged owing to the mole rats' digging activity have been shown to be characterised by less electrical conductivity than surrounded soil. This effect is due to the changes of the mounds bulk's density and moisture. The effect of the mole rats' digging activity on the soil electrical conductivity has been found not to be restricted by the geometrical border of the mounds. The mounds are surrounded by 1–1.5 m halo of increased soil electrical conductivity. The halo size is increased with the aging of the mound and with the compacting of their aggregation.

Введение

Роющая активность слепышей оказывает комплексное влияние на почву, растительность, почвенных животных, активность микробиологических процессов в почве [1; 3–6; 8]. В большинстве работ характер педотурбационного влияния животных изучается в формате «влияние – контроль». Однако результаты воздействия имеют сложную пространственную динамику, которая изменяется во времени. В полной мере выявить характер воздействия роющей активности можно только в контексте пространственного оценивания динамики экосистемных процессов, индуцированных педотурбационной активностью [7]. Применение геоинформационных технологий и геостатистических подходов является перспективным в экологии почвенных животных [10]. Потенциал ГИС-подхода можно реализовать при наличии большого объема пространственно-координированных данных. Поэтому разработка методически простых, но экологически релевантных, индикаторных показателей, которые можно собрать в короткое время, способствует развитию пространственной экологии почвенных животных.

Электрическая проводимость почв является интегральным показателем, который зависит от ряда важных свойств почвы: влажности, гранулометрического и агрегатного состава, химизма почвенного раствора и т. д. [2; 9]. Этот показатель легко измерять. Сложный характер динамики показателя позволяет использовать его для отражения гетерогенности свойств почвенного покрова.

Цель исследования – оценить закономерности пространственной изменчивости электрической проводимости почвы в условиях педотурбационной активности слепышей на различных масштабных уровнях (отдельного порою, системы пороев) и в различные периоды года (весна, осень).

Материал и методы исследований

Электропроводность измеряли в разные периоды года (в конце весны и начале осени) на однотипных степных участках. Экспериментальный полигон 1 заложен на участке степной целины на склоне байрака Яцев Яр северной экспозиции (48°19'31,60" с. ш., 35°11'39,15" в. д.), полигон 2 – на участке степной целины на склоне восточной экспозиции балки вблизи с. Любимовка (48°21'30,26" с. ш., 35°11'53,78" в. д.).

Полигон 1 представляет собой совокупность 90 соприкасающихся ячеек размером 1 × 1 м. Ячейки составляют 9 трансект по 10 в каждой. Полигон имеет форму прямоугольника со сторонами 10 и 9 м. Большая сторона полигона ориентирована по направлению восток – запад. По углам ячеек 1 мая 2010 года проведены измерения электрической проводимости почвы в 110 точках.

Полигон 2 представляет собой совокупность 180 соприкасающихся ячеек размером 1,5 × 1,5 м. Ячейки составляют 9 трансект по 20 в каждой. Полигон имеет форму прямоугольника со сторонами 30,0 и 13,5 м. Большая сторона полигона ориентирована по направлению восток – запад. По углам ячеек 15 сентября 2010 года проведены измерения электрической проводимости почвы в 210 точках.

Вблизи полигонов 1 и 2 выбрано по одному свежему порою в качестве модельных. Измерения проводили одновременно с измерениями на соответствующих полигонах. В области каждого модельного порою заложен квадратный полигон со стороной 1,2 м. Измерения проводили в ячейках с шагом 0,1 м. Полигон представлен 12 трансектами по 12 ячеек в каждой. Всего заложено 144 ячейки. Ячейка № 7 по оси абсцисс и № 7 по оси ординат совпадает с центральной частью порою. Всего в пределах каждого модельного порою проведено 169 измерений электропроводности. Измерение электрической проводимости почвы (*apparent soil electrical conductivity* – ЕСа) производили с

помощью сенсора 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). Сравнение результатов измерений прибором HI 76305 с данными лабораторных исследований позволили Pennisi и van Iersel оценить коэффициент перевода единиц как $1 \text{ дС/м} = 155 \text{ мг/л}$.

Статистические расчеты проведены в программе Statistica 7.0. Оценивание гео-статистических параметров и картографирование проведено с помощью программы Surfer 8.02. Вычисление индекса Морана проведено с помощью программы GeoDa 0.9.5.-i5, индексы дисперсии и Морисита вычислены в программе PASSaGE 2.

Результаты и их обсуждение

Вес почвы в одном поросе (средняя геометрическая по выборке) составляет 9,52 кг (8,35–10,87 кг). Различия по весу поросов в двух полигонах не достоверны ($I' = 0,03$; $p = 0,87$). С течением времени отношение высоты пороя к диаметру основания уменьшается вплоть до нуля, когда порой перестает существовать. Этот показатель в полигоне 1 составляет 0,24 (95 % доверительный интервал – 0,19–0,30), а в полигоне 2 – 0,16 (0,15–0,17), что достоверно ниже ($I' = 24,59$; $p > 0,001$). Распределение отношения высота/диаметр в полигоне 1 бимодальное (асимметрия – –0,14, эксцесс – –1,78) и значительно отличается от нормального закона распределения (тест Колмогорова – Смирнова 0,23, $p < 0,10$), так как порою на этом участке в период исследования (начало мая) представлены двумя возрастными классами: прошлогодними пороями, а также свежими пороями текущего года. Распределение отношения высота/диаметр в полигоне 2 унимодалное (асимметрия – 0,31, эксцесс – 0,09) и значительно не отличается от нормального закона распределения (тест Колмогорова – Смирнова – 0,13). Летом роющая активность слепышей минимальна, а осенний ее пик наступает после обильных осенних осадков, что наблюдается обычно в конце сентября или октябре. Очевидно, что скорость уменьшения отношения высота/диаметр у поросов со временем неравномерна, поэтому молодые порою «догоняют» по этому показателю старые, вследствие чего менее чем через полгода распределение становится унимодалным.

По морфологическим показателям модельные порою являются типичными.

Удельное число поросов на полигонах 1 и 2 практически одинаково (0,31 и 0,32 шт./м²) (табл. 1). Также не существенно различаются полигоны по интенсивности педотурбационной активности (отношение вес поросов / площадь участка составляет 4,11 и 4,44 кг/м² соответственно).

Индексы дисперсии и Морисита свидетельствуют о более высоком уровне агрегированности поросов на полигоне 2, чем на полигоне 1. Вследствие этого среднее расстояние от центра поросов до точек измерения на полигоне 2 больше (1,17 м), чем на полигоне 1 (0,73 м). Для модельных поросов этот показатель сопоставим с диаметром самого пороя. Электропроводность почвы в области отдельного пороя составляет 0,50 дС/м весной и 0,77 дС/м – осенью (табл. 2). Различия статистически достоверны ($I' = 95,35$; $p < 0,001$). Изменчивость признака в обоих случаях практически одинакова: коэффициент вариации равен 38,8 % (весной) и 39,8 % (осенью).

В пределах полигона 1 показатель электропроводности составил 0,86 дС/м. В результате роющей активности слепышей электропроводность почвы в области поросов снижается. Так как в пределах участка, занятого одним поросом, доля поверхности, покрытой почвенными выбросами, выше, чем на полигоне, наблюдаются различия в

средних значениях электропроводности почвы. Значение электропроводности на полигоне 2 ниже, чем на полигоне 1, что, очевидно, связано с затуханием педотурбационного эффекта по мере старения пороев. Коэффициент вариации электропроводности также уменьшается с увеличением возраста системы пороев.

Таблица 1

Морфологические характеристики пороев и их пространственного размещения

Показатель	Порой № 1	Полигон № 1	Порой № 2	Полигон № 2
Площадь участка, м ²	1,44	90	1,44	405
Число пороев	1	28	1	130
Удельное число пороев, шт./м ²	0,69	0,31	0,69	0,32
Дисперсия	–	12,03	–	15,06
Индекс Морисита	–	1,78	–	2,01
Среднее расстояние до центроида порою, м	0,49	0,73	0,49	1,17
Диаметр порою, см	57,25	59,32	57,00	58,8
Высота порою, см	18,87	14,28	12,00	9,4
Объем порою, дм ³	27,78	27,13	16,21	16,31
Масса порою, кг	8,78	9,75	8,67	9,48
Общая масса пороев на полигоне, кг	–	370,65	–	1799,11
Отношение массы/площадь участка, кг/м ²	–	4,11	–	4,44

Таблица 2

Статистические и геостатистические характеристики электрической проводимости почвы в области пороев сепьяна

Показатель	Порой № 1	Полигон № 1	Порой № 2	Полигон № 2
Среднее, дС/м	0,50	0,86	0,77	0,54
Медиана	0,52	0,90	0,76	0,54
Стандартное отклонение	0,20	0,22	0,31	0,08
Асимметрия	-0,07	-1,18	0,13	0,01
Экссесс	-0,09	0,46	-0,46	0,92
CV, %	38,97	25,58	39,89	15,50
χ^2	18,72	75,62	3,77	2,29
p-уровень	0,00	0,00	0,92	0,81
d	0,09	0,18	0,06	0,12
p-уровень	< 0,20	< 0,01	–	< 0,01
Модель	Гаусса	волновая	сферическая	сферическая
C ₀ (Налет)	0,02	0,02	0,02	0,003
C _f (Частичный порог)	0,03	0,52	0,08	0,003
C ₀ + C _f (Порог)	0,05	0,54	0,11	0,007
SDI, %	34,75	3,70	20,79	49,27
Радиус влияния, м	0,41	0,47	0,91	21,9
I-Морана	0,51	-0,05	0,41	0,36
p-уровень	0,001	0,24	0,001	0,001
R ² тренда	0,39	0,03	0,42	0,41

Примечания: статистика χ^2 и d – тест Колмогорова – Смирнова соответствия нормальному распределению; SDI – уровень пространственной зависимости (spatial dependence level) $(100 \cdot C_0 / (C_0 + C_f))$.

Изменчивость электропроводности почвы в области отдельного порою имеет четко выраженную пространственную компоненту, о чем свидетельствуют достоверные значения индекса Морана. Вариограмма пространственного процесса для порою 1 описывается моделью Гаусса, а для порою 2 – сферической моделью. Адекватность различных моделей подчеркивает особенности изучаемого явления. Для гауссовой мо-

дели характерно наличие резкого перегиба кривой вариограммы, а для сферической модели – плавный выход вариограммы на плато.

Значение показателя позволяет оценить уровень пространственной зависимости электропроводности в отдельном порое как умеренный весной ($SDL = 34,7\%$) и очень сильный – осенью ($SDL = 20,7\%$) по Cambardella et al. Анализ пространственного изменения электропроводности позволяет выявить область пониженного уровня этого показателя, связанную непосредственно с выбросами слепыша на поверхность почвы и окружающую область с фоновыми (более высокими) значениями (рис. 1).

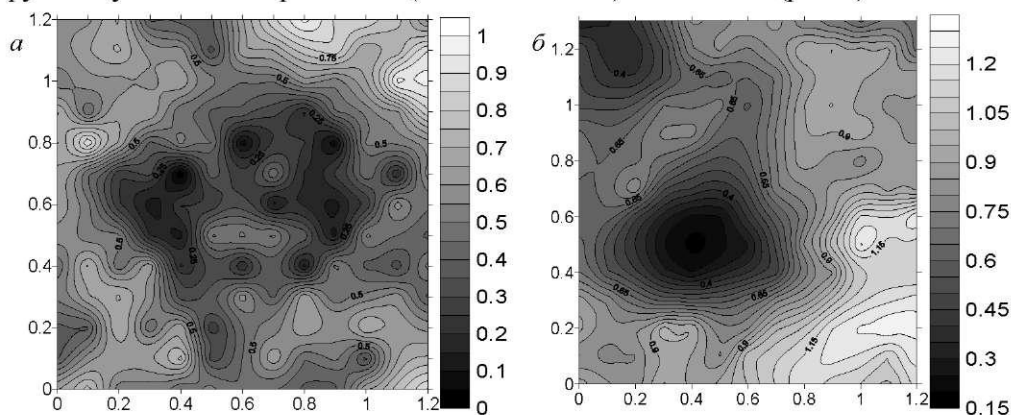


Рис. 1. Электрическая проводимость почвы в пределах одного пороя (дС/м):

а – порой 1, б – порой 2

Причина снижения электропроводности в выбросах связана с меньшей плотностью сложения почвы, вследствие чего увеличивается доля почвенного воздуха, который обладает значительно меньшей электропроводностью, чем твердая или жидкая фазы почвы. Кроме того, поры быстро теряют влагу, которая также является важным проводником электрического тока.

Отмеченная закономерность четко может быть прослежена в двумерной проекции. Центральная часть пороя отличается сниженной электропроводностью, а по мере удаления от центроида пороя электропроводность достигает максимального уровня, после чего наблюдается снижение до фонового уровня (рис. 2). Необходимо отметить существование локального максимума на расстоянии 50–70 см от центроида пороя весной и 50–90 см – осенью. Этот максимум находится за пределами геометрических границ пороя (радиус пороя составляет 28–30 см). Очевидно, что почва, из которой состоит порой, поднимается слепышом из глубоких горизонтов, и отличается от почвы на поверхности более высоким содержанием минеральных веществ, которые обладают хорошими электропроводными свойствами. Почва в порое быстро высыхает и легко разносится ветром, оседая в наибольшей степени в непосредственной близости от границ пороя, вследствие чего вокруг пороя формируется ореол с повышенной электропроводностью.

Закономерности изменения электропроводности почвы в области одного пороя могут помочь объяснить картину, которая наблюдается на другом масштабном уровне (рис. 3, 4). Расположение пороев в пределах экспериментальных полигонов четко маркируется областями с пониженной электропроводностью. Пространственное изменение электропроводности почвы весной (полигон 1) гораздо более контрастно, чем осенью (полигон 2).

Распределение данного показателя весной не подчиняется нормальному закону, асимметрично со сдвигом вправо (положительная асимметрия) и с отрицательным эксцессом (двувершинное). Поэтому на карте изменчивости электропроводности весной

использованы логарифмированные значения признака. Для геостатистического описания изменчивости электропроводности весной использована волновая модель, что также отражает значительную периодическую контрастность свойств почвы вследствие активной педотурбационной активности слепышей, пик которой наблюдается весной. Показатель SDL свидетельствует о высокой пространственной зависимости процесса при описании его с помощью волновой модели. При этом I -статистика Морана не показывает пространственной зависимости, что связано с отсутствием пространственного тренда изменчивости признака (трендовая модель описывает лишь 2 % изменчивости признака). Радиус влияния модели равен аналогичному показателю, вычисленному для отдельного порога. Таким образом, в пределах экспериментального полигона весной пространственная изменчивость электропроводности практически полностью определяется педотурбационной активностью слепышей.

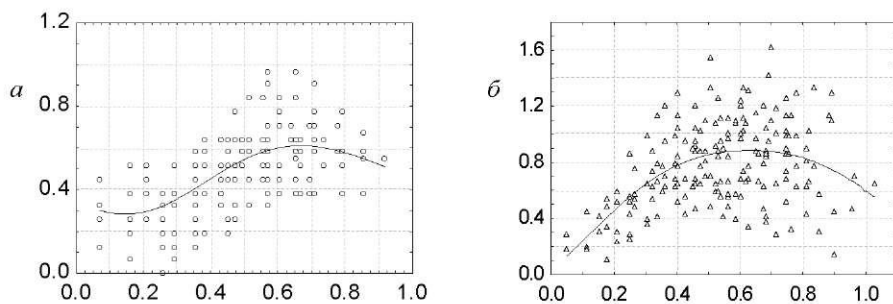


Рис. 2. Изменения электропроводности (дС/м) по мере удаления от центра отдельного порога (ось абсцисс, м): а – порой 1, б – порой 2

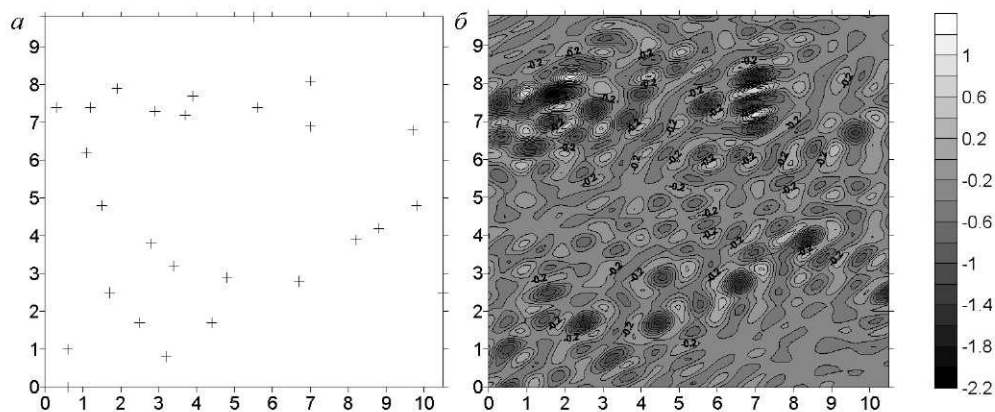


Рис. 3. Расположение пороев на полигоне 1 (а) и электрическая проводимость почвы в пределах полигона 1 (б) (логарифмический масштаб, дС/м)

Распределение значений электропроводности осенью описывается нормальным законом. Адекватной пространственной моделью процесса является уже не волновая, а сферическая. По показателю SDL значение пространственной компоненты в изменчивости признака следует признать как умеренное (49,2 %). I -статистика Морана подтверждает наличие достоверной пространственной компоненты изменчивости. Важную роль в пространственной изменчивости признака играет тренд второй степени, который способен описать 41 % изменчивости признака. Интенсивность педотурбационного влияния на электропроводность осенью существенно снижается по сравнению с весной, что проявляется в снижении амплитуды колебаний признака вблизи порога относительно фонового уровня и увеличении радиуса влияния (рис. 5).

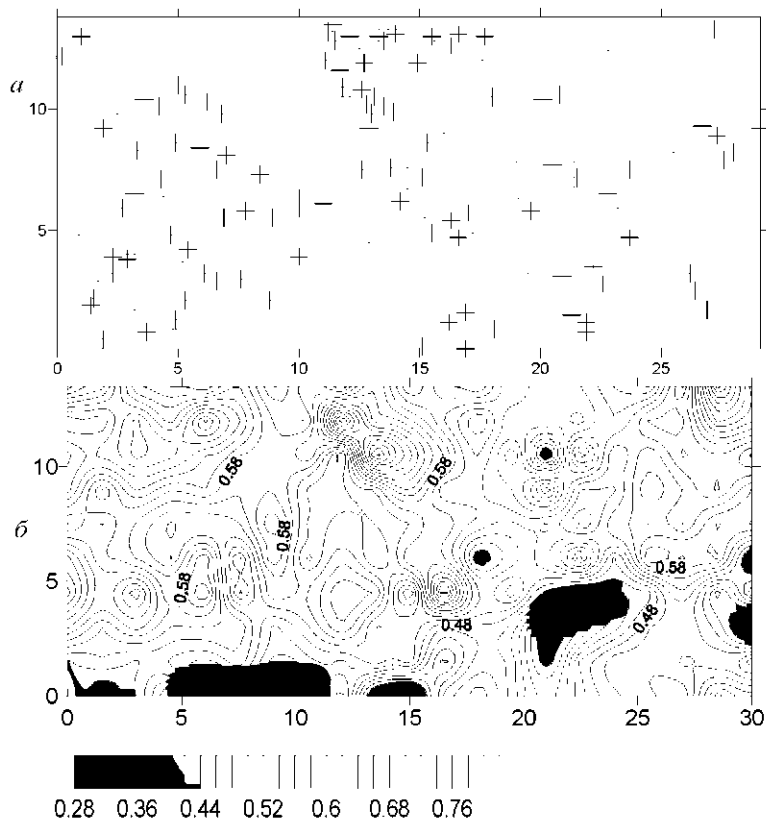


Рис. 4. Расположение поров на полигоне 2 (а) и электрическая проводимость почвы (б, дС/м)

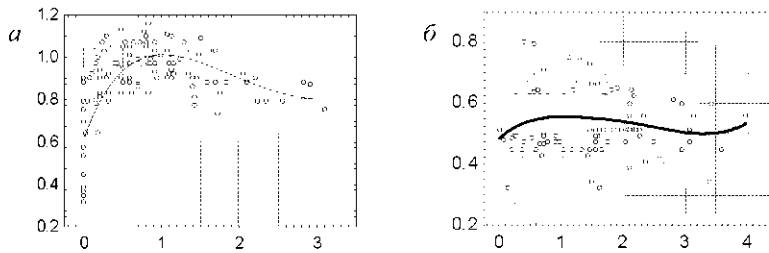


Рис. 5. Изменение электропроводности (дС/м) по мере удаления от центра поря (ось абсцисс, м) в пределах полигона: а – полигон 1, б – полигон 2

Для весенних поров локальный максимум электропроводности почвы наблюдается на расстоянии не более 1 м. Осенью это расстояние увеличивается до 1,5 м. Следует отметить, что указанная тенденция наблюдается на фоне неизменного значения среднего диаметра поров весной и осенью. Если эти результаты сравнить с данными, полученными для отдельных поров, окажется, что диапазон педотурбационного возмущения электропроводности почвы выше для системы поров, чем для отдельного поря. Этот функциональный синергизм является эмерджентным свойством системы поров. Характер и степень его проявления зависят от возраста поров и их взаимного расположения. С увеличением возраста и при более высокой агрегации поров синергизм проявляется в большей степени. Для дифференциации роли возраста поров и их взаимного расположения требуются дополнительные исследования.

