



УДК УДК 631.421+622.882

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТВЕРДОСТИ РЕКУЛЬТИВИРУЕМЫХ ПОЧВ

ЖУКОВ

Александр Викторович

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, zhukov_dnepr@rambler.ru

ЗАДОРОЖНАЯ

Галина Александровна

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, zadorojhnayagalina@gmail.com

Ключевые слова:

твердость почвы
экоморфический анализ
техноземы
многомерное шкалирование

Аннотация: Исследована пространственная неоднородность дерново-литогенной почвы на лесовидных суглинках участка рекультивации Никопольского марганцево-рудного бассейна в г. Покров (Украина) по показателям твердости. Проведен экоморфический анализ растительности участка. Путем неметрического многомерного шкалирования осуществлена ординация данных твердости почвы. Применен трехмерный вариант многомерного шкалирования. Выделены характерные для изученной почвы типы распределения твердости по профилю. Взаимосвязь варьирования твердости почвы и факторов окружающей среды установлена при использовании фитоиндикационных шкал. Для получения наибольшей ранговой корреляции использовали матрицу на основе расстояния Махаланобиса с показателями, предварительно стандартизованными к диапазону 0–1. Установлено, что факторами, формирующими первую ординационную ось экологического пространства, являются аэрация почвы, омбродрежим и континентальность климата. Второе измерение определяют вариации влажности почвы. Наиболее высокое значение в формировании третьей ординационной оси имеют шкалы терморегима и освещения. С помощью техники пространственного анализа данных (PCNM) выделены пространственные структуры на разных масштабных уровнях и определены процессы, лежащие в основе их формирования.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: О. Г. Лопатовская

Получена: 14 февраля 2017

Подписана к печати: 28 октября 2017 года

Введение

Существование закономерной неоднородности почв на небольших пространствах является доказательством множественности строения и свойств почв и следствием разнонаправленного действия факторов почвообразования и особенно сложных и противоречивых взаимосвязей почвенного тела с растительностью и климатом (Михеева, 2005; Плisko, Трускавецкий, 2010; Задорожна, 2012). Наблюдаемая пространственная структура представляет собой результат до-

полняющих друг друга причин абиотического, биологического и исторического характера и проявляется на различных масштабных уровнях (Dray et al., 2006; Jiménez Juan et al., 2014). Пространственная неоднородность почв нарушенных промышленностью земель является актуальным предметом научных исследований в связи с возрастающей интенсивностью антропогенного пресса и вопросами хозяйственного назначения нарушенных территорий (Ворон, 2010).

По В. И. Вернадскому, жизнь развивается

в совокупном единстве среды и населяющих ее организмов (Вернадский, 1960). Отношения организма и среды системны, в них действует принцип экологического соответствия: форма существования организма всегда соответствует условиям жизни (Реймерс, 1975; Глухов и др., 2012). Установлено, что сосудистые растения проявляют свой биоэкологический потенциал в экстремальных условиях техногенной среды, приспосабливаясь к ней в соответствии со своими биологическими и экологическими особенностями. В техногенных экотопах рост, развитие и внешний вид растений зависят от того, в какой степени отвечают экологические условия местообитания требованиям тех или иных видов. Существующая взаимосвязь между физико-химическими характеристиками субстратов и процессами сингенеза растительности на эдафотопях техногенного происхождения дает возможность использовать фитокомпоненту как интегральный показатель состояния техногенных экотопов и формирующихся биогеоценозов в целом (Глухов и др., 2012). Функциональная целостность биогеоценоза предполагает, что почва должна проявлять морфологически и функционально свое соответствие другим его компонентам.

Показателем почвенных свойств, обладающим интегральностью и высокой информативностью, является ее твердость (Медведев, 2009). Варьирование твердости почвы в пространстве достоверно коррелирует с такими показателями, как проективное покрытие, фитомасса, агрегатный состав верхнего слоя грунта и его электропроводность (Бондарь, Жуков, 2011; Жуков и др., 2014; Жуков, 2015). Твердость почвы является лимитирующим фактором для растительного покрова. Глубина возникновения предельной твердости принимает участие в формировании участка экологического пространства с крупнейшими продукционными характеристиками, а приближение пороговой твердости к поверхности почвы связано с изменением видового богатства исследуемой растительной группировки. Целью настоящей работы является выяснение роли факторов окружающей среды в формировании неоднородности рекультивационной почвы по показателям твердости. Задачами исследования стали:

1. Исследование изменчивости почвы по регулярной сетке.
2. Фитоиндикационное оценивание факторов окружающей среды в каждой точке опытного полигона.

3. Оценка связи пространственной изменчивости твердости почвы и факторов среды.

4. Выявление регулярных составляющих неоднородности почвы и роли внешних факторов в их формировании.

Материалы

Сбор материала проводили в июне 2012 г. на участке рекультивации Никопольского марганцево-рудного бассейна в г. Покров (Украина). Экспериментальный участок по изучению оптимальных режимов сельскохозяйственной рекультивации был создан в 1968–1970 гг. на внешнем отвале Запорожского марганцево-рудного карьера. На данном участке были созданы искусственные эдафотопы двух типов. Первый – на спланированной смеси вскрышных пород с отсыпкой на их поверхность различных по мощности слоев черноземной массы. Второй представляет собой спланированные вскрышные породы толщиной 2 м, которые были вынесены из разных глубин. В качестве объекта данного исследования была выбрана дерново-литогенная почва на лессовидных суглинках. Название почвы приведены по Л. В. Етеревской (Етеревська та ін., 2008). По классификации почв России, исследуемая почва относится к группе «натурфабрикаты», подгруппе «литостраты» (Шишов и др., 2004). В настоящее время тип растительности представлен бобово-злаковой смесью и разнотравьем.

Опытный полигон представляет собой регулярную сетку, которая состоит из точек отбора проб, расстояние между которыми составляет 3 м и состоит из 7 трансект по 15 проб. Соответственно, его размеры составляют 42 м × 18 м.

Методы

Измерения твердости почвы проведены в полевых условиях с помощью ручного пенетromетра Eijkelkamp на глубину до 50 см с интервалом 5 см. Основной рабочей частью твердомера является плунжер, навинченный на нижний конец штока, который с помощью рукоятки через пружину вталкивается в исследованный грунт. При этом измеряющая пружина сжимается пропорционально величине сопротивления деформации почвы (Задорожна, 2012; Жуков, Задорожна, 2015а). Средняя погрешность результатов измерений прибора составляет ±8 %. Измерения твердости почвы сделаны конусом поперечного сечения 2 см² в каждой ячейке полигона.

Фитоиндикационные шкалы приведены по Я. П. Дидуку (Didukh, 2011), ценоморфы растений – по А. Л. Бельгарду (Бельгард, 1950). К эдафическим фитоиндикационным шкалам относятся показатели гидроморф (Hd), переменной увлажнения (fH), аэрации (Ae), режима кислотности (Rc), солевого режима (Sl), содержания карбонатных солей (Ca), содержания усваиваемых форм азота (Nt). К климатическим шкалам относятся показатели терморегима (Tm), омброрегима (Om), криорегима (Cr) и континентальности климата (Kn). Кроме указанных, выделяется еще шкала освещения (Lc), которую характеризуют как микроклиматических шкалу. Тепловые свойства почв индицируются шкалой терморегима, а гидротермические – шкалой омброрегима. Ценоморфы растений приведены по А. Л. Бельгарду (1950) и В. В. Тарасову (2012). Ценоморфы представлены степантами, пратантами, псаммофитами, сальвантами и рудерантами. Степанты и пратанты составляют основную часть растительного покрова (95 %), поэтому именно эти экоморфы использованы как предикторы твердости почвы (переменные St и Pr – проективное покрытие соответствующих экоморф в %). Гигроморфы представлены ксерофитами (уровень влажности 1), мезоксерофитами (уровень влажности 2), ксеромезофитами (уровень влажности 3), мезо-

фитами (уровень влажности 4), гигромезофитами (уровень влажности 5).

При статистических расчетах использованы методы описательной статистики. Для снижения размерности пространства показателей твердости почвы было использовано неметрическое многомерное шкалирование (Prentice, 1977; Minchin, 1987; Толстова, 2006).

Результаты

Средние значения твердости почвы увеличиваются с глубиной от 3.99 ± 0.11 МПа на поверхности до 9.73 ± 0.27 МПа на глубине 50 см вниз по профилю. Коэффициент корреляции наивысший на поверхности (40.79 %) снижается более чем вдвое на глубине 15–20 см (18.51 %) и на уровне 25–50 см остается достаточно стабильным, колеблясь в пределах 33.26–37.88 % (табл. 1). Глубина, на которой в среднем встречается твердость в 3 МПа, находится на уровне 6.72 см ниже поверхности. Коэффициент вариации этой величины высок – 61.56 %. Упомянутая твердость, по данным ряда авторов, является критической для роста корней растений (Медведев, 2008; Бондарь, Жуков, 2011). При сопротивлении почвы выше 3 МПа корневой волосок не в состоянии его преодолеть, он прекращает свой рост. Величина 6.72 см ограничивает объем, в котором сосредоточена основная масса корней растений изученного участка.

Таблица 1. Описательные статистики твердости почвы

Твердость почвы на глубине	Среднее	Доверительный интервал		CV, %
		–95 %	+95 %	
0–5 см	3.99 ± 0.11	3.68	4.31	40.79
5–10 см	6.33 ± 0.22	5.91	6.76	34.54
10–15 см	7.81 ± 0.16	7.16	7.90	25.33
15–20 см	8.42 ± 0.25	7.53	8.09	18.51
20–25 см	8.09 ± 0.17	7.88	8.97	33.26
25–30 см	8.78 ± 0.20	8.23	9.33	32.39
30–35 см	8.85 ± 0.21	8.26	9.45	34.51
35–40 см	9.05 ± 0.22	8.39	9.71	37.66
40–45 см	9.49 ± 0.26	8.80	10.20	37.88
45–50 см	9.73 ± 0.27	9.03	10.44	37.65
<i>Глубина (в см), с которой начинается твердость почвы</i>				
3 МПа	6.72	5.92	7.52	61.56

Для изучения взаимосвязи варьирования твердости почвы и организации растительности был применен экоморфический анализ (Бельгард, 1950). Он построен на использовании информации о требованиях, составляющих биогеоценоз популяций к параметрам среды (температуре, освещенности, питательным веществам, влажности). Благодаря своей структурированности эта классическая концепция естественным образом может быть описана с помощью языка математической биологии (Didukh, 2011). Установлено, что фитоиндикационные шкалы относительно почвенных свойств обладают большей индикативностью, чем прямое измерение параметров окружающей среды (Жуков, 2015). В нашем исследовании они выступают как связующее звено между структурой растительности и твердостью почвы.

Ординация данных твердости почвы проведена путем неметрического многомерного шкалирования. Многие эксперты признают, что этот метод дает наиболее адекватные результаты, особенно в больших блоках материала с сильными шумами (случайными отклонениями) (Legendre, Gallagher, 2001; Новаковский, 2008; Oksanen et al., 2011; Тарасов, 2012; Medina et al., 2012). Суть его состоит в снижении размерности пространства для отображения исходного многомерного массива данных. Для этого может быть выбрана некоторая мера, которая определяет расстояние между рассматриваемыми объектами. Алгоритм моделирует размещение точек в некотором n -мерном пространстве таким образом, чтобы расстояния между точками в n -мерном пространстве были как можно ближе к расстояниям, определенным для m -мерного пространства, где m – число изучаемых объектов. При этом n – число ординационных осей, или шкал, – заведомо невелико, т. е. $m > n$. В результате количество информационно важных измерений становится меньше, а шкалы получают свойства композиционности (Толстова, 2006; Borcard, 2011).

В нашем случае информационная ценность для диагностики факторов внешней среды переходит от данных твердости почвы как самостоятельных источников информации к осям экологического пространства. В процессе многомерного шкалирования эти оси отображаются измерениями.

Процедура предполагает вычисление ранговой корреляции матриц дистанций между сайтами измерения твердости и ма-

триц дистанций, установленными на основе факторов окружающей среды. В качестве факторов окружающей среды в нашем исследовании выступают оценки эдафотопы и климатопы, выраженные через фитоиндикационные шкалы.

Для получения наибольшей ранговой корреляции при проведении неметрического многомерного шкалирования проводят выбор меры связи между объектами, а также предварительное преобразование первичных данных (Legendre, Gallagher, 2001). В качестве мер связи используют следующие метрики: эвклидова, манхеттеновская, Гувера, Брея-Куртиса, Кульчинского, Морисита, Горна-Морисита, Као, Жаккара, Маунфорда, Рауп-Крика, Канберра, Чао, Махаланобиса (Oksanen et al., 2011).

В табл. 2 приведены результаты вычисления корреляции Спирмена с матрицами дистанций между сайтами отбора проб, установленными по твердости почвы и матрицами дистанций, найденными на основе факторов окружающей среды. Использованные варианты первичного преобразования данных (Жуков, 2015) перечислены в подписи под таблицей.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что наибольшей корреляцией с факторами среды характеризуется матрица на основе расстояния Махаланобиса с показателями, предварительно стандартизованными к диапазону 0–1. При дальнейших вычислениях экспериментальные данные будут использоваться в преобразованном упомянутым способом виде.

Для определения степени сходства между исходной матрицей расстояний и расстояниями между точками вводится функция стресса. Стресс, равный нулю, обозначает полную тождественность сравниваемых матриц. Задача ординации сводится к подбору таких координат точек в новом пространстве, чтобы величина стресса между модельной и эмпирической матрицей была минимальной, а соответственно, подобие матриц максимальным.

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что трехмерный вариант многомерного шкалирования достаточен для точного отображения исходного массива данных твердости почвы, так как увеличение числа измерений выше указанного не приводит к существенному приросту точности отображения (рис. 1).

Таблица 2. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена матриц мер различия-подобия между сайтами отбора проб твердости почвы и переменных окружающей среды

Метрика	Способ трансформации данных										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Эвклидова	0.08	0.06	0.07	0.09	0.08	0.07	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09
Манхеттен- ская	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08
Гувера	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08
Брея-Куртиса	0.07	0.06	0.06	0.08	0.07	0.07	0.08	0.06	0.08	0.08	0.08
Кульчинского	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.06	0.08	0.08	0.08
Морисита	0.01	–	–	0.04	–0.03	0.01	–0.04	–0.03	–0.04	0.02	–0.01
Горна- Морисита	0.09	0.07	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.06	0.09	0.09	0.09
Као	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.06	0.08	0.08	0.08
Жаккара	0.07	0.06	0.06	0.08	0.07	0.07	0.08	0.06	0.08	0.08	0.08
Моунфорда	–	–	–	–	–	–	–	0.00	–	–	–
Рауппа-Крика	–	–	–	–	–	–	–	0.03	–	–	–
Канберра	0.06	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06	0.08	0.05	0.08	0.08	0.08
Чео	–	–	–	–	–	–	–	0.02	–	–	–
Махаланобиса	0.15	0.10	0.13	0.10	0.15	0.15	0.09	0.16	0.09	0.10	0.11

Примечание. Условные обозначения: 1 – данные не трансформированы; 2 – логарифмированные данные; 3 – корень квадратный; 4 – данные, деленные на маргинальную сумму; 5 – данные, деленные на маргинальный максимум; 6 – данные, деленные на маргинальную сумму и умноженные на число ненулевых значений; 7 – нормализованные данные (маргинальная сумма квадратов значений равна 1); 8 – стандартизовано к диапазону 0–1; 9 – преобразование Хеллинджера; 10 – χ^2 -трансформация; 11 – висконсинская трансформация.

Интерпретация найденных измерений осуществляется на основе анализа матрицы средневзвешенных значений многомерных осей для показателей твердости почвы (табл. 3). Факторные веса позволяют ранжировать, упорядочить объекты (которыми в нашем случае является твердость почвы на разных глубинах) по каждой многомерной шкале и увидеть меру проявления измерения у отдельного исходного объекта. Чем больше факторный вес некоторого объекта (по модулю), тем больше в нем проявляется та сторона явления или та закономерность, которая отражается данным фактором.

Многомерная ось NMDS1 обособляет блок положительных значений, соответствующий слоям почвы на глубине 5–25 см с наиболее весомым на уровне 5–10 см ниже поверхности, и противопоставляет им отри-

цательные величины весов, соответствующих слоям, расположенным выше и ниже выделенного блока. NMDS2 маркирует условия, отличающие твердость почвы на уровне 10–40 см профиля с наиболее значимыми весами, соответствующими слоям 25–30 см от остальной толщи почвы. Многомерная шкала NMDS3 выделяет как наиболее значимое строение поверхностного слоя (0–5 см) и отражает противоположные явления в строении почвы выше и ниже уровня 30 см от поверхности.

На основании полученных данных можно выделить характерные для изученной почвы типы распределения твердости по профилю. В первом случае наблюдается реципрокное взаимодействие между твердостью почвы в слоях 5–25 см ниже поверхности с твердостью слоев, лежащих выше и ниже вы-

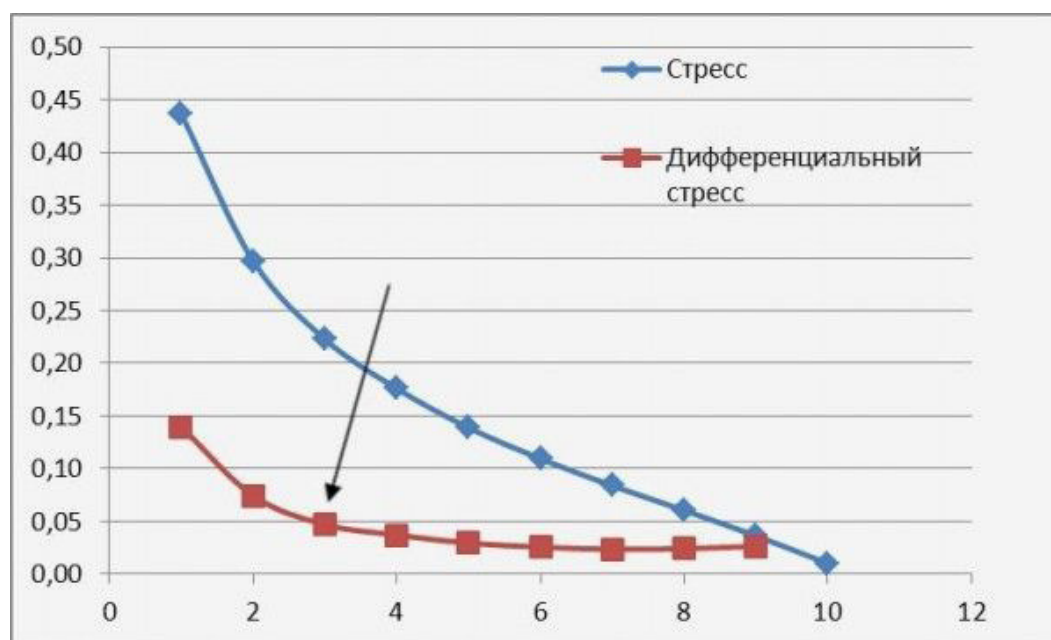


Рис. 1. Зависимость дифференциального стресса от числа измерений: ось абсцисс – число измерений; ось ординат – стресс (ось слева) и дифференциальный стресс (ось справа); стрелкой указана зона резкого перегиба линии дифференциального стресса

Fig. 1. Dependence of differential stress on the number of measurements: x-axis is the number of measurements; vertical axis is stress (on the left) and differential stress (on the right); arrow shows the zone of sharp inflection of differential stress line

Таблица 3. Ординационная конфигурация на основе средних весов значений твердости почвы в почвенных слоях

Твердость почвы на глубине	Многомерные шкалы		
	NMDS1	NMDS2	NMDS3
0–5 см	–1.42	0.51	3.89
5–10 см	3.24	1.65	1.22
10–15 см	2.17	–0.39	–0.09
15–20 см	0.99	–0.18	0.15
20–25 см	0.13	–0.24	0.45
25–30 см	–0.33	–2.72	0.26
30–35 см	–1.04	–2.24	–0.42
35–40 см	–0.95	–0.38	–1.39
40–45 см	–0.71	1.04	–1.45
45–50 см	0.10	0.89	–1.51

деленного блока. Иными словами, высокие значения твердости почвы в выделенном слое будут сопровождаться пониженными значениями изучаемого признака выше и ниже его, и наоборот. Следующим закономерным явлением для изученного участка является случай, когда строение почвы на уровне 10–40 см вглубь профиля будет отличаться от строения окружающего грунта. Еще одной выделенной закономерностью можно считать такое строение почвы, когда наблюдаются существенные отличия твердости почвы выше и ниже уровня 30 см от

поверхности с наиболее значимыми для данного типа строения значениями твердости поверхностного слоя.

В табл. 4 отображена доля дисперсии изучаемого признака, которая объяснена фитоиндикационными шкалами, а также распределение информационной значимости между многомерными осями. Статистически значимые фитоиндикационные шкалы описывают от 8 до 18 % вариабельности многомерных измерений. Каждое измерение распределяет исследуемые объекты вдоль некоторого экологического тренда, который

Таблица 4. Оценка связи с факторами среды в координационном пространстве

Фитоиндикационные шкалы	NMDS1	NMDS2	NMDS3	r^2	Pr(>r)	Коды значимости
Hd	–0.09	0.84	–0.53	0.11	0.01	*
fFl	–0.43	0.10	–0.90	0.06	0.11	
Rc	–0.93	–0.14	–0.33	0.01	0.81	
Sl	–0.89	0.16	0.43	0.04	0.24	
Ca	0.10	–0.79	–0.61	0.03	0.30	
Nt	0.25	0.21	–0.94	0.05	0.19	
Ae	–0.99	–0.13	0.06	0.09	0.03	*
Tm	0.04	0.08	–1.00	0.18	0.00	***
Om	–0.86	0.45	–0.24	0.10	0.01	**
Kn	–0.81	0.26	–0.52	0.11	0.01	*
Cr	0.64	–0.03	–0.77	0.12	0.01	**
Lc	–0.43	–0.18	–0.88	0.08	0.05	*
Hygr	0.10	0.56	–0.82	0.09	0.03	*
Troph_B	0.26	–0.89	0.38	0.07	0.06	.
St	0.51	–0.58	–0.63	0.10	0.02	*
Pr	0.74	0.18	–0.65	0.16	0.00	***
Hel	0.66	–0.28	–0.70	0.07	0.07	.

Примечание. Коды значимости: *** – <0.001; ** – <0.01; * – <0.05.

можно интерпретировать в терминах одного или нескольких преобладающих коррелятивных признаков. Эти тренды имеют сложную композитную природу и образуют определенную структуру, отражающую наиболее существенные черты изучаемой системы. Такая модель дает возможность вычислять вклады факторов внешней среды в общую дисперсию изучаемого признака: чем выше доля вклада, тем более значимым, существенным является фактор.

Наибольшая доля объясненной дисперсии многомерной оси NMDS1 принадлежит фитоиндикационной шкале аэрации почвы (Ae). Также высокой объяснительной способностью обладают шкалы омброрежима и континентальности климата. Факторами, определяющими вторую ординационную ось, являются шкалы гидроморф (Hd), степантов (St) и пратантов (Pr). Они связаны таким образом, что противопоставляют в растительном сообществе долю проективного покрытия пратантов, с одной стороны, и степантов – с другой. Наиболее высокое значение в формировании NMDS3 имеет шкала терморегуляции (Tm). Следующий по значимости вклад в формирование этого измерения вносит шкала освещения (Lc).

При интерпретации этих измерений в первую очередь рассматриваются эдафические

шкалы, так как вариабельность почвенных свойств проявляется на меньшем масштабном уровне, чем климатических. Климат не меняется на характерных для данного экспериментального участка расстояниях и, следовательно, оказывает не дифференцирующее, а нивелирующее воздействие на почву. Он, однако, в числе других факторов задает набор возможных на данной территории составляющих почвы, воздействуя как прямо, так и опосредованно через другие факторы. Корреляции климатических шкал могут быть результатом согласованных трендов растительного сообщества, инициированных эдафической компонентой (Жуков, 2015).

Данные, представленные в табл. 4, дают общее представление о взаимодействии изучаемого свойства почвы и формирующих его внешних факторов как о линейной системе. Однако почва, как динамическая биокостная система, не является пассивным продуктом воздействия внешних причин. На рис. 2 представлены векторы экологических факторов и их изолинии в пространстве осей многомерного шкалирования. Даже на ограниченном расстоянии экспериментального полигона зависимость полученных данных от влияния изученных экологических факторов не является линейной, что подчеркивает различную масштабность их эффектов.

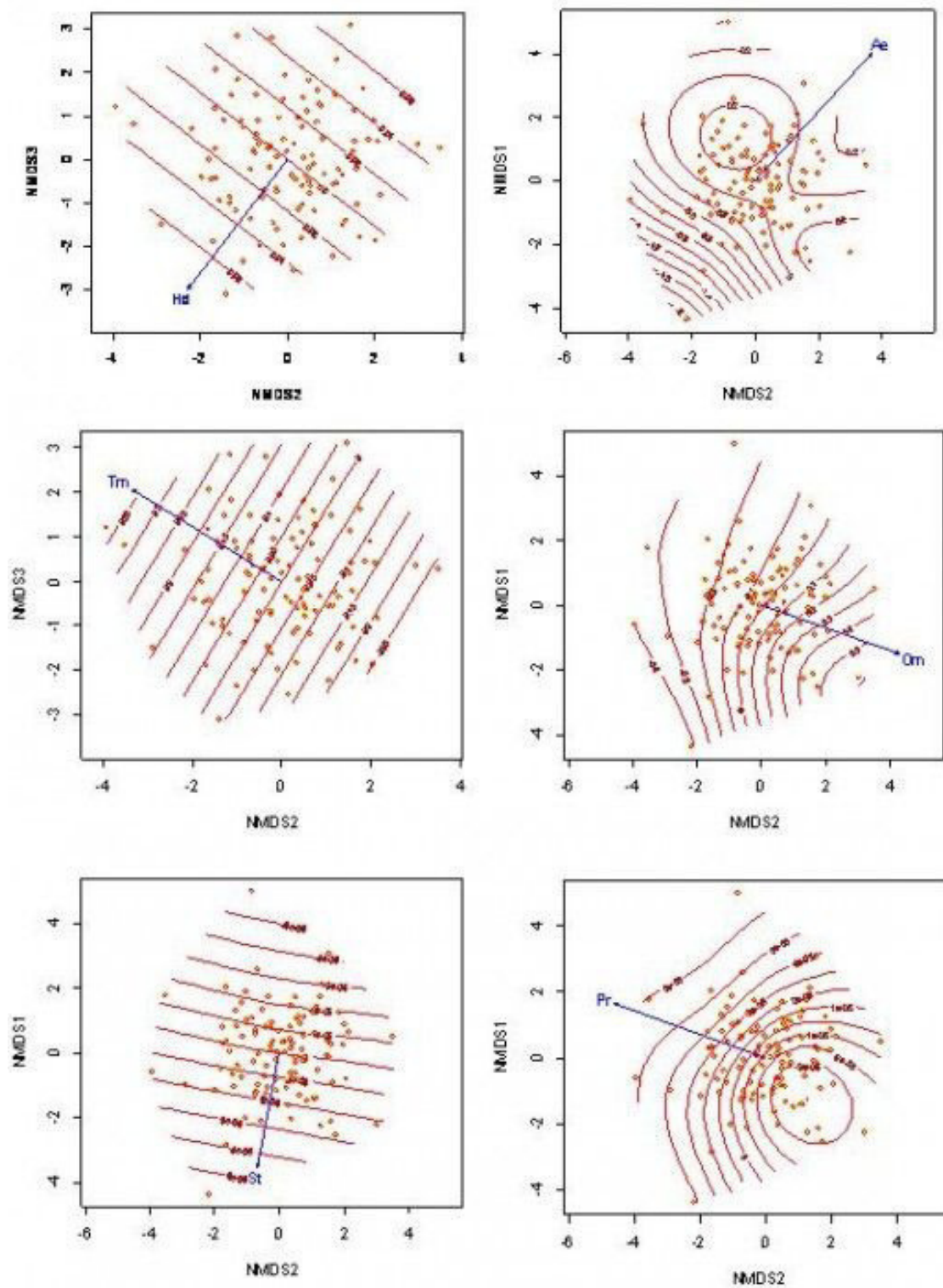


Рис. 2. Сглаживающие поверхности для некоторых экологических факторов в координационной диаграмме

Fig. 2. Smoothing surfaces for some ecological factors in coordination diagram

Большое значение для объяснения неоднородности свойств почв имеет пространственная структура изучаемого явления (Дмитриев, 2001; Козловский, 2003; Самсонова, 2008; Медведев, 2008, 2009; Жуков, Задорожная, 2015; Zhukov, Zadorozhnaya, 2016). Пространственная неоднородность почвенных свойств обусловлена либо факторами внешней среды (куда входят как биотическая, так и абиотическая компоненты), либо внутрпочвенными процессами. Для детальной характеристики экологически обусловленных почвенных явлений необходимо определить пространственные структуры и выделить процессы, лежащие в их основе. Значение имеет также масштабность проявления неоднородности. Для достижения этих целей была применена техника пространственного анализа данных – метод главных координат матрицы сосед-

ства (PCNM – *principal coordinates of neighbor matrices*). Она основана на построении модифицированной усеченной матрицы расстояний между точками отбора проб, анализа ее главных координат (Borcard, Legendre, 2002) и отбора PCNM-переменных, наилучшим образом описывающих изучаемые свойства объекта исследования (Borcard et al., 2001, 2004; Dray et al., 2006; Blanchet et al., 2008).

В процессе PCNM-анализа было выделено 55 PCNM-переменных, которые отвечали собственным числам, превышающим 1. Эти переменные описывают 57 % изменчивости твердости почвы (найдено с помощью функции *RsquareAdj* пакета *vegan*). На рис. 3 представлено наглядное изображение характера изменчивости десяти наиболее информативных из них, выделенных с помощью процедуры прямого выбора.

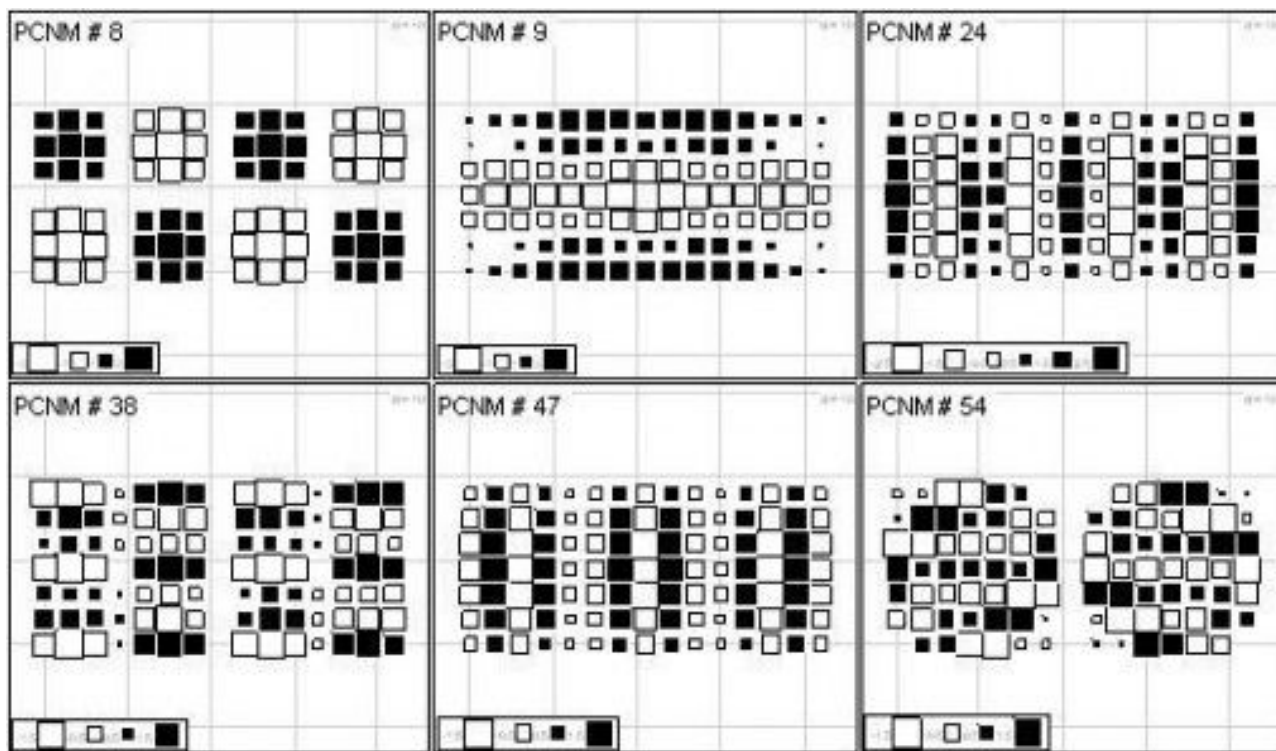


Рис. 3. Пространственное размещение значений PCNM-переменных

Fig. 3. Spatial allocation of PCNM-variables

PCNM-переменные расположены в порядке убывания масштаба изменчивости. Можно визуально выделить две группы масштабных уровней: 8, 9, 24 PCNM-переменные представляют глобальные тренды, 38, 47, 54 – детальные особенности изменения твердости почвы.

Переменные, оставленные после прямого выбора, описывают 17.82 % изменчивости

твердости почвы.

Для каждого подмножества PCNM-переменных выделены канонические оси, пространственная изменчивость которых представлена на рис. 4. Это совокупный результат, обрисовывающий формы почвенной неоднородности на разных масштабных уровнях.

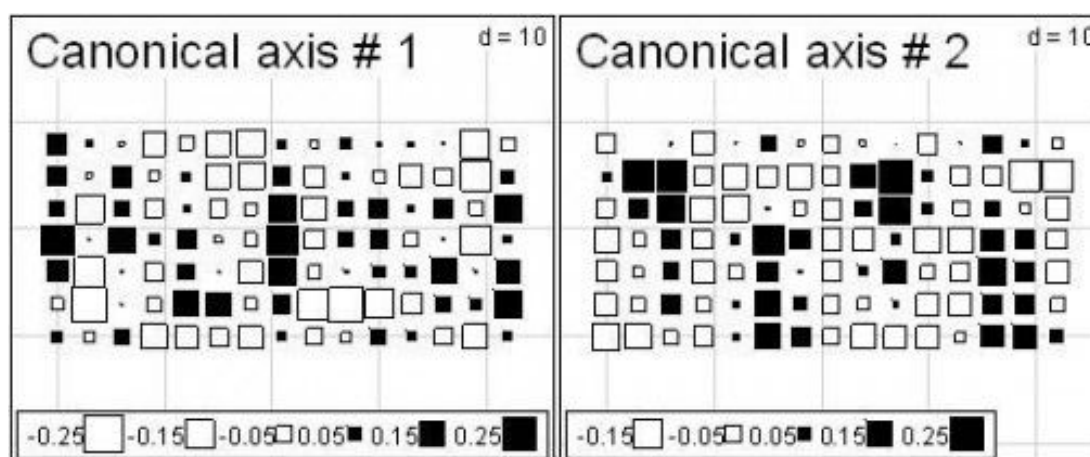


Рис. 4. Пространственное размещение канонических осей широкомасштабных и детальномасштабных компонент

Fig. 4. Spatial allocation of the canonical axes obtained as a result of the redundancy analysis of various scale spatial components

Для выяснения характера связи канонических осей, отображающих паттерны пространственной изменчивости твердости почвы на различных пространственных уровнях, с факторами среды был проведен регрессионный анализ (табл. 5).

Таблица 5. Регрессионный анализ пространственной субмодели переменных среды

Фитоиндикационные шкалы	Крупномасштабная компонента				Детальномасштабная компонента			
	β	SE	t значение	p-уровень	β	SE	t значение	p-уровень
Hd	-0.18	0.14	-1.31	0.19	-0.06	0.13	-0.43	0.67
ffl	0.36	0.16	2.32	0.02	0.13	0.15	0.92	0.36
Rc	0.21	0.13	1.57	0.12	-0.08	0.13	-0.64	0.52
Sl	-0.21	0.13	-1.59	0.12	-0.07	0.12	-0.55	0.58
Ca	-0.30	0.15	-1.95	0.05	0.10	0.14	0.70	0.49
Nt	-0.10	0.12	-0.82	0.42	0.18	0.11	1.57	0.12
Ae	-0.40	0.17	-2.33	0.02	0.22	0.16	1.38	0.17
Tm	0.10	0.16	0.65	0.52	0.11	0.15	0.75	0.45
Om	0.30	0.14	2.11	0.04	-0.14	0.13	-1.10	0.27
Kn	-0.46	0.17	-2.72	0.01	0.08	0.16	0.52	0.61
Cr	-0.22	0.17	-1.32	0.19	0.18	0.15	1.15	0.25
Lc	0.23	0.13	1.72	0.09	0.06	0.12	0.50	0.62
Hygr	0.61	0.31	1.96	0.05	0.07	0.29	0.22	0.82
Troph_B	0.27	0.27	1.02	0.31	0.14	0.25	0.57	0.57
St	0.12	0.22	0.54	0.59	0.39	0.20	1.92	0.06
Pr	-0.28	0.17	-1.66	0.10	0.27	0.16	1.71	0.09
Hel	-0.04	0.24	-0.16	0.87	-0.56	0.23	-2.45	0.02

Примечание. β – стандартизованный регрессионный коэффициент, SE – стандартная ошибка β . (см. примечания к табл. 4)

Для формирования крупномасштабной компоненты изменчивости твердости почвы значение имеет переменность увлажнения, аэрация почвенной толщи, омброклимат и континентальность (Кп). Неоднородности детального масштаба маркируются соотношением в растительном сообществе различных экоморф растений: представителями степной, луговой растительности, а также формами растений с различной чувствительностью к режиму освещения (Hel). Неслучайный характер варьирования твердости почвы и зависимости от внешних факторов говорит о наличии закономерности в строении почвы как природного тела и как элемента биогеоценоза.

Обсуждение

Почва является объектом и средством сельскохозяйственного производства. На протяжении веков накоплены данные о почве как среде обитания, субстрате, в котором существуют живые организмы и укореняются растения (Мигунова, 2015). В противовес попыткам превращения почвоведения из академической науки в теоретический базис для сельскохозяйственного производства мы предлагаем посмотреть на проблему с другой стороны. В данном исследовании установлено изменение твердости почвы под влиянием параметров среды, выраженных через фитоиндикационные шкалы. Показано наличие пространственной структуры, выделены факторы среды, лежащие в основе ее организации. Пространственная структура разложена на составляющие, имеющие закономерный характер и различную масштабность своих эффектов. Установлено, что для формирования крупномасштабных составляющих почвенной неоднородности большее значение имеют экологические факторы, такие как переменность увлажнения, аэрация, омброклимат и континентальность. В то же время неоднородность меньшего масштаба формируется под влиянием пестроты растительного покрова. В исследованиях, опубликованных нами ранее, показано наличие пространственной зависимости данных твердости этой почвы и других рекультивационных земель (Задорожная, 2012; Жуков и др., 2014; Жуков, Задорожная, 2015а). Зафиксировано присутствие закономерной морфологической конфигурации и корреляции данных твердости с распределением показателей ее твердости, наблюдавшимся в предыдущем году. Описан сложный характер взаимодействия растительного по-

крова и морфологической организации почвы, который оказывает упорядочивающее воздействие на почвенное тело (Жуков, Задорожная, 2015б). Существование достоверной связи почвенного строения с интенсивностью и направленностью экологических факторов и структурой растительного покрова доказывает, что почва реагирует, приспособливает свои свойства к условиям своего существования в биогеоценозе. Такое свойство принадлежит к фундаментальным качествам живых организмов и ставит почву в один ряд с ними. Неполная согласованность морфологической и функциональной организации при выраженном иерархическом строении является фундаментальным признаком биокостных тел как систем, классическим представителем которых является почва (Арманд, 1992).

Заключение

1. Средние значения твердости почвы увеличиваются с глубиной от 3.99 ± 0.11 МПа на поверхности до 9.73 ± 0.27 МПа на глубине 50 см вниз по профилю. Коэффициент корреляции наивысший на поверхности (40.79 %) снижается более чем вдвое на глубине 15–20 см (18.51 %) и на уровне 25–50 см остается достаточно стабильным, колеблясь в пределах 33.26–37.88 %.

2. Выделены характерные для изученной почвы типы распределения твердости по профилю. В первом случае наблюдается реципрокное взаимодействие между твердостью почвы в слоях 5–25 см ниже поверхности с твердостью слоев, лежащих выше и ниже выделенного блока. Следующим закономерным явлением для изученного участка является случай, когда строение почвы на уровне 10–40 см вглубь профиля будет отличаться от строения окружающего грунта. Еще одной выделенной закономерностью можно считать такое строение почвы, когда наблюдаются существенные отличия твердости почвы выше и ниже уровня 30 см от поверхности с наиболее весомыми для данного типа строения значениями твердости поверхностного слоя.

3. В трехмерном экологическом пространстве, определенном с помощью многомерного шкалирования, факторами, формирующими первую ординационную ось, являются аэрация почвы, омброрежим и континентальность климата. Второе измерение определяют вариации влажности почвы. Наиболее высокое значение в формировании третьей ординационной оси имеют шкалы

терморегима и освещения. Статистически значимые фитоиндикационные шкалы описывают от 8 до 18 % варибельности многомерных измерений.

4. Выделены пространственные структуры горизонтальной изменчивости твердости почвы на разных масштабных уровнях. Для

формирования крупномасштабной компоненты изменчивости значение имеет переменность увлажнения, аэрация почвенной толщи, омброклимат и континентальность. Неоднородности детального масштаба маркируются соотношением в растительном сообществе различных экоморф растений.

Библиография

- Арманд А. Д. Механизмы устойчивости геосистем . М.: Наука, 1992. 208 с.
- Бельгард А. Л. Лесная растительность юго-востока УССР . Киев: Изд-во КГУ, 1950. 263 с.
- Бондарь Г. А., Жуков А. В. Экологическая структура растительного покрова, сформированного в результате самозарастания дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. 2011. № 1. С. 54–62.
- Вернадский В. И. Собрание избранных сочинений . М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 5. С. 57–61
- Ворон Е. А. Свойства создаваемой почвы при послышной горнотехнической и биологической рекультивации // Науковий вісник НГУ. 2010. № 5. С. 23–28.
- Глухов А. З., Хархота А. И., Прохорова С. И., Агурова И. В. Фитоадаптивная типизация техногенных экотопов // Промышленная ботаника. 2012. Вып. 12. С. 3–11.
- Дмитриев Е. А. Теоретические и методологические проблемы почвоведения . М.: ГЕОС, 2001. 374 с.
- Естеревська Л. В., Момот Г. Ф., Лехцієр Л. В. Рекультивовані ґрунти: підходи до класифікації і систематики // Ґрунтознавство: науковий журнал. 2008. Т. 9. № С. 147–150.
- Жуков А. В., Задорожная Г. А. Оценка экоморфогенеза педозема и чернозема обыкновенного на основе показателей твердости // Міжвідомчий тематичний науковий збірник «Агрохімія і ґрунтознавство». Вип. 81. Харків: ННЦ «ІГА ім. О. Н. Соколовського», 2015. Вип. 84. С. 72–80.
- Жуков А. В., Задорожная Г. А. Роль внегоризонтных почвенных морфоструктур в организации растительности дерново-литогенных почв на лёссовидных суглинках (Никопольский марганцеворудный бассейн) // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: біологія. 2015. Вип. 24. С. 171–186.
- Жуков А. В., Задорожная Г. А., Демидов А. А., Рысина Е. В. Экологическое значение пространственной изменчивости твёрдости почвы в условиях природного земледелия // Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. Умань, 2014. Вип. 84. С. 21–37.
- Жуков О. В. Фітоіндикаційне оцінювання вимірів, одержаних за допомогою багатовимірних шкалювання структури рослинного угруповання // Чорноморський ботанічний журнал. 2015. Т. 11. № 1. С. 84–98.
- Задорожна Г. О. Просторова організація дерново-літогенних ґрунтів на сіро-зелених глинах // Біологічний вісник МДПУ ім. Б. Хмельницького. 2012. № 1. С. 48–57.
- Козловский Ф. И. Теория и методы изучения почвенного покрова . М.: ГЕОС, 2003. 536 с.
- Медведев В. В. Структура почвы . Харьков, 2008. 406 с.
- Медведев В. В. Твердость почвы . Харьков: Изд-во КП «Городская типография», 2009. 152 с.
- Мигунова Е. С. Почва как среда обитания растений // Міжвідомчий тематичний науковий збірник «Агрохімія і ґрунтознавство». Харків: ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського», 2015. Вип. 84. С. 112–121.
- Михеева И. В. Пространственные флуктуации и вероятностно-статистические распределения свойств каштановых почв Кулундинской степи // Почвоведение. 2005. № 3. С. 316.
- Новаковский А. Б. Методы ординации в современной геоботанике // Вестник ин-та биологии Коми НЦ УрО РАН. 2008. Вып. 132. № 10. С. 2–8.
- Тарасов В. В. Флора Дніпропетровської і Запорізької областей Видання друге. Доповнене та виправлене. Д.: Ліра, 2012. 296 с.
- Толстова Ю. Н. Основы многомерного шкалирования . М.: КДУ, 2006. 160 с.
- Пліско І. В., Трускавецький С. Р. Дослідження просторової неоднорідності ґрунтів Михайлівської цілини // Вісник ЦЗН АПВ Харківської області. 2010. Вип. 9. С. 217–224.
- Реймерс Н. Ф. Экология. Теория, законы, принципы и гипотезы . М.: Россия Молодая, 1994. 367 с.
- Самсонова В. П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: На примере дерново-подзолистых почв . М.: Издательство ЛКИ, 2008. 160 с.
- Толстова Ю. Н. Основы многомерного шкалирования . М.: КДУ, 2006. 160 с.
- Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России . Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Blanchet F. G., Legendre P. and Borcard D. Forward selection of explanatory variables // Ecology. 2008. Vol. 89. № 9. P. 2623–2632.

- Borcard D. and Legendre P. All-scale spatial analysis of ecological data by means of principal coordinates of neighbour matrices // *Ecological Modelling*. 2002. Vol. 153. № 1. P. 51–68.
- Borcard D., Legendre P., Carol A.-J. and Hanna T. Dissecting the spatial structure of ecological data at multiple scales // *Ecology*. 2004. Vol. 85. № 7. P. 1826–1832.
- Borcard D., Gillet F. and Legendre P. *Numerical ecology in R*. Springer, New York, 2011. 306 p.
- Didukh Ya. P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. Phytosociocentre. Kyiv, 2011. 176 p.
- Dray S., Legendre P., Peres-Neto P. R. Spatial modelling: a comprehensive framework for principal coordinate analysis of neighbour matrices (PCNM) // *Ecol Model*. 2006. Vol. 196. P. 483–493.
- Jiménez Juan J., Decaëns T., Lavelle P., Rossi J. Dissecting the multi-scale spatial relationship of earthworm assemblages with soil environmental variability *BMC // Ecology*. 2014. Vol. 14. P. 26–51.
- Legendre P., Gallagher E. D. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data // *Oecologia*. 2001. Vol. 129. № 2. P. 271–280.
- Medina C., Camacho-Tamayo Jesus H., Cortes C. A. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods // *Eng. Agric. Jaboticabal*. 2012. Vol. 32. № 1. P. 91–101.
- Minchin P. R. An evaluation of the relative robustness of techniques for ecological ordination // *Vegetatio*. 1987. Vol. 67. P. 1167–1179.
- Oksanen J., Blanchet R., Kindt P. Legendre et al. *Community Ecology Package*. R package version 2.0-2. 2011. URL: <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Prentice I. C. Non-metric ordination methods in ecology // *Journal of Ecology*. 1977. Vol. 65. P. 85–94.
- Zhukov A., Zadorozhnaya G. Spatial heterogeneity of mechanical impedance of a typical chernozem: the ecological approach // *Ekológia (Bratislava)*. 2016. Vol. 35. № 3. P. 263–278.

SPATIAL HETEROGENEITY OF MECHANICAL HARDNESS OF REPLANTOZEMS

ZHUKOV
Alexandre Viktorovich

Oles Honchar National University of Dnipro,
zhukov_dnepr@rambler.ru

ZADOROZHNYAYA
Galina Alexandrovna

Oles Honchar National University of Dnipro,
zadorozhnayagalina@gmail.com

Key words:
soil hardness
ecomorphic analysis
industrial soils
multidimensional scaling

Summary: Spatial heterogeneity of sod-lithogenic soil was investigated on loess loam within the experimental remediation polygon of the Nikopol manganese ore basin in Pokrov (Ukraine) on soil mechanical impedance characteristics. Ecomorphic analysis of vegetation was made. The ordination of soil mechanical hardness data was produced by means of non-metric multidimensional scaling. Three-dimensional variant of multidimensional scaling was applied. The types of mechanical hardness profile distribution specific for studied soils were determined. The relationship between soil mechanical hardness variation and environmental factors was stated by means of phytoindicators method. To receive the greatest rank correlation, matrix based on the Mahalanobis distance was used with the indicators pre-standardized to the range of 0-1. It was found that the factors that form the first ordination axis of ecological space were soil aeration, ombroregime and climate continentality. The second axis was found to be determined by the variation of soil moisture. In the formation of the third ordination axis thermo-regime and light scales had the greatest values. Using the technique of spatial data analysis (PCNM) the spatial structures were recovered at different scale levels, and the processes underlying their formation were identified.

Reviewer: O. G. Lopatovskay

Received on: 14 February 2017

Published on: 28 October 2017

References

- Armand A. D. Mechanisms of geosystems stability. M.: Nauka, 1992. 208 p.
- Bel'gard A. L. Forest vegetation of the south-east of Ukraine. Kiev: Izd-vo KGU, 1950. 263 p.
- Blanchet F. G., Legendre P. and Borcard D. Forward selection of explanatory variables, *Ecology*. 2008. Vol. 89. No. 9. R. 2623–2632.
- Bondar' G. A. Zhukov A. V. Ecological structure of plant cover formed as a results of self-growing of the sod-lithogenic soils on loess-like clays, *Visnik Dnipropetrovs'kogo derzhavnogo agrarnogo universitetu*. 2011. No. 1. P. 54–62.
- Borcard D. and Legendre P. All-scale spatial analysis of ecological data by means of principal coordinates of neighbour matrices, *Ecological Modelling*. 2002. Vol. 153. No. 1. R. 51–68.
- Borcard D., Gillet F. and Legendre P. Numerical ecology in R. Springer, New York, 2011. 306 p.
- Borcard D., Legendre P., Carol A. J. and Hanna T. Dissecting the spatial structure of ecological data at multiple scales, *Ecology*. 2004. Vol. 85. No. 7. R. 1826–1832.
- Didukh Ya. P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. *Phytosociocentre*. Kyiv, 2011. 176 p.
- Dmitriev E. A. Theoretical and methodological problems of soil science. M.: GEOS, 2001. 374 p.
- Dray S., Legendre P., Peres-Neto P. R. Spatial modelling: a comprehensive framework for principal coordinate analysis of neighbour matrices (PCNM), *Ecol Model*. 2006. Vol. 196. P. 483–493.
- Gluhov A. Z. Harhota A. I. Prohorova S. I. Agurova I. V. Phytoadaptive typization of technogenic ecotopes, *Promyshlennaya botanika*. 2012. Vyp. 12. P. 3–11.
- Jiménez Juan J., Decaëns T., Lavelle P., Rossi J. Dissecting the multi-scale spatial relationship of earthworm assemblages with soil environmental variability *BMC, Ecology*. 2014. Vol. 14. P. 26–51.
- Kozlovskiy F. I. Theory and methods of soil cover study. M.: GEOS, 2003. 536 p.
- Legendre P., Gallagher E. D. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data, *Oecologia*. 2001. Vol. 129. No. 2. R. 271–280.
- Medina C., Camacho-Tamayo Jesus H., Cortes P. A. Soil penetration resistance analysis by multivariate and

- geostatistical methods, Eng. Agric. Jaboticabal. 2012. Vol. 32. No. 1. R. 91–101.
- Medvedev V. V. Hardness of soil. Har'kov: Izd-vo KP «Gorodskaya tipografiya», 2009. 152 p.
- Medvedev V. V. Soil structure. Har'kov, 2008. 406 p.
- Migunova E. S. Soil as a habitat of plants. Ecological Soil Science, Mizhvidomchy`j tematy`chny`j naukovy`j zbirny`k «Agroximiya i g`runtoznastvo». Xarkiv: NNCz «IGA im. O.N. Sokolovs`kogo», 2015. Vip. 84. C. 112–121.
- Miheeva I. V. Spatial fluctuations and probabilistic and statistical distribution of properties of chestnut soil of the Kulundinskaya steppe, Pochvovedenie. 2005. No. 3. P. 316.
- Minchin P. R. An evaluation of the relative robustness of techniques for ecological ordination, Vegetatio. 1987. Vol. 67. P. 1167–1179.
- Yeterevs`ka L. V., Momot G. F., Lexciyer L. V. Recultivated soils: establishment, diagnostic, estimation, G`runtoznastvo: naukovy`j zhurnal. 2008. T. 9. No. P. 147–150.
- Novakovskiy A. B. Ordination methods in modern geobotanics, Vestnik in-ta biologii Komi NC UrO RAN. 2008. Vyp. 132. No. 10. P. 2–8.
- Oksanen J., Blanchet R., Kindt P. Legendre et al. Community Ecology Package. R package version 2.0-2. 2011. URL: <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Plisko I. V., Truskavetz`ky`j S. R. Investigation of the Mihailivska cilina soils heterogeneity, Visny`k CzZN APV Xar`kivs`koyi oblasti. 2010. Vip. 9. P. 217–224.
- Prentice I. C. Non-metric ordination methods in ecology, Journal of Ecology. 1977. Vol. 65. P. 85–94.
- Reymers N. F. Ecology. Theory, laws, principles and hypothesis. M.: Rossiya Molodaya, 1994. 367 p.
- Samsonova V. P. Spatial variability of the soil properties: on the example of sod-podzol soils. M.: Izdatel'stvo LKI, 2008. 160 p.
- Shishov L. L. Tonkonogov V. D. Lebedeva I. I. Gerasimova M. I. Classification and diagnostics of soils in Russia. Smolensk: Oykumena, 2004. 342 p.
- Tarasov V. V. Flora of the Dnipropetrovsk and Zaporizhia regions, Vy`dannya druge. Dopovnene ta vy`pravlene. D.: Lira, 2012. 296 p.
- Tolstova Yu. N. Basics of multidimensional scaling. M.: KDU, 2006. 160 p.
- Tolstova Yu. N. Multidimensional scales basis. M.: KDU, 2006. 160 p.
- Vernadskiy V. I. Collection of Selected Works. M.: Izd-vo AN SSSR, 1960. T. 5. P. 57–61
- Voron E. A. Properties of soil created by means of layerwise mine-technical and biological recultivation, Naukoviy visnik NGU. 2010. No. 5. P. 23–28.
- Zadorozhna G. O. Spatial organization of soddy lithogenic soils on grey-grin clays, Biologichny`j visny`k MDPU im. B. Xmel`ny`cz`kogo. 2012. No. 1. P. 48–57.
- Zhukov A. V. Zadorozhnaya G. A. Demidov A. A. Rysina E. V. Ecological significance of spatial variability of soil penetration resistance in the conditions of natural farming, Zbirny`k naukovy`x prac` Umans`kogo nacional`nogo universy`tetu sadivny`cz`tva. Uman`, 2014. Vy`p. 84. P. 21–37.
- Zhukov A. V. Zadorozhnaya G. A. Pedozem and chernozem ecomorphogenesis assessment on the basis of soil penetration resistance data, Mizhvidomchy`j tematy`chny`j naukovy`j zbirny`k «Agroximiya i g`runtoznastvo». Vy`p. 81. Xarkiv: NNC «IGA im. O. N. Sokolovs`kogo», 2015. Vip. 84. C. 72–80.
- Zhukov A. V. Zadorozhnaya G. A. Role of the horizon-over morphological structures in vegetation organization of the sod-litogeny soils on loess-like clays (Nikopol manganese ore basin), Visny`k Xarkivs`kogo nacional`nogo universy`tetu imeni V.N. Karazina. Seriya: biologiya. 2015. Vy`p. 24. P. 171–186.
- Zhukov A., Zadorozhnaya G. Spatial heterogeneity of mechanical impedance of a typical chernozem: the ecological approach, Ekológia (Bratislava). 2016. Vol. 35. No. 3. P. 263–278.
- Zhukov O. V. Phytoindicator estimation of the multidimensional scaling dimantion of the plant communities structure, Chornomors`ky`j botanichny`j zhurnal. 2015. T. 11. No. 1. P. 84–98.