



УДК 631.421+622.882

## Пространственно-временная динамика твердости рекультивированных почв, сформированных в результате добычи полезных ископаемых открытым способом

А.В. Жуков, Г.А. Задорожная

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина*

На основе изучения пространственно-временной динамики твердости почвы обосновано существование экоморф техноземов как внегоризонтных почвенных образований. Исследования проведены на научно-исследовательском стационаре по изучению процессов рекультивации в г. Орджоникидзе. Измерение твердости техноземов проводилось в полевых условиях с помощью пенетрометра Eijkelkamp по регулярной сетке на глубину до 50 см с интервалом 5 см. Оценка средних показателей и степени вариации произведена с помощью инструментов описательной статистики. Степень сопряженности пространственного распределения показателей почвенного тела в разные годы исследования установлена с помощью корреляционного анализа. Определены показатели варьирования в пространстве и во времени твердости техноземов, сформированных на лессовидных суглинках, серо-зеленых, красно-бурых глинах, а также педоземов. Установлена степень пространственной зависимости твердости техноземов послойно, а также линейные размеры внегоризонтных почвенных структур – почвенных экоморф. Описан характер временной динамики твердости изученных почв. Получены данные, подтверждающие гипотезу о существовании экоморф как внегоризонтных морфологических почвенных образований. Предложен экоморфический подход к изучению морфологического строения техноземов. Даны сравнительные характеристики почвенных экоморф различных типов техноземов. Полученные результаты решают проблему сопоставления высших и низших уровней в иерархической системе организации почвы как природного тела, что повышает эффективность анализа отношений морфологических элементов в качестве основы детальной реконструкции процессов рекультивации, становления почв, изучения их режимов и функций.

*Ключевые слова:* твердость почвы, рекультивация, строение почвы, экоморфы

## Spatio-temporal dynamics of the penetration resistance of recultivated soils formed after open cast mining

A. V. Zhukov, G. A. Zadorozhnaya

*Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Dnipropetrovsk, Ukraine*

On the basis of studying the spatio-temporal dynamics of soil penetration resistance we proved the existence of the technozem ecomorphs as above horizon soil formations. Research was carried out at a research center for study of recultivation processes in Ordzhonikidze city. Measurement of soils penetration was made in field conditions using an Eijkelkamp penetrometer on a regular grid at depths of up to 50 cm with intervals of 5 cm. Calculation of average values and degrees of variation was performed by means of descriptive statistical tools. The extent of soil penetration spatial dependence was assessed and the existence of ecomorphs was proved by means of geostatistical analysis. The degree of associativity of spatial distribution of indicators of a soil body in different years of research was established by means of correlation analysis. The level of variation in space and in time of technozem penetration generated on loess-like loams, grey-green, red-brown clays, and also pedozems was revealed. The degree of spatial dependence of technozem penetration within soil layers and also the linear sizes of ecomorphs as above horizon soil structures was established. The time dynamics of penetration of various recultozems were described. As a result of research into the spatio-temporal dynamics of penetration of technozems, data confirming the hypothesis of the existence of ecomorphs as above horizon morphological soil formations were obtained. An ecomorphic approach to the study of the morphological structure of technozems is proposed. The comparative characteristics of ecomorphs from various types of

technozem are presented. The results obtained solve the problem of combining the higher and lowest levels in the hierarchical system of soil organisation as a natural body, which should raise the efficiency of the analysis of relations of morphological elements as a basis for detailed reconstruction of recultivation processes, soil formation, and study of their regimes and functions.

*Keywords:* mechanical impedance; recultivation; soils composition; ecomorphs

## Введение

Процесс биологического этапа рекультивации земель, нарушенных в результате открытых горных разработок, сводится к формированию устойчивого биогеоценоза, который по своим структурным и функциональным особенностям способен выполнить целевые задачи, ставящиеся в зависимости от типа рекультивации – сельскохозяйственной, лесной, рекреационной, природоохранной (Bekarevich and Masyuk, 1976; Voron, 2010). Экоморфы являются компонентами биогеоценоза и отражают характер их взаимосвязи в целом и с каждым из структурных элементов в отдельности. В основе экоморфического анализа лежит выявление взаимосвязей живых организмов и среды, а также установление степени приспособления отдельных частей экосистемы к наиболее важным ее элементам, что в прикладном аспекте позволяет количественно определять напряженность экологических режимов (Belgard and Travleev, 1980). Наиболее востребованной системой экоморф является концепция, разработанная в 1950 году А.Л. Бельгардом (Belgard, 1950; Chernyishenko and Lyisenko, 2008). Она позволяет осуществлять качественную оценку растительных сообществ и их сравнение между собой, что применяется исследователями достаточно широко (Diduh and Plyuta, 1991; Emsharov, 1996; Matveev, 2003; Zhukov, 2010). Показаны высокие возможности для фитоиндикации пространственной неоднородности эдафических свойств техноземов на мезоуровне (Bondar and Zhukov, 2011).

Для различных компонентов биогеоценоза проблема системы экоморф решена в разной степени. Разработан экоморфический подход зоологической диагностики почв, который базируется на идеях русского генетического почвоведения В.В. Докучаева. Они выражаются в том, что почвы должны диагностироваться на основании тех признаков и свойств, которые отражают их генезис. Информационными каналами этого метода выступают экоморфы животных (Zhukov, 2010). Зоологический метод диагностики рекультивируемых почв предложен в работах Е.В. Андрусевич (Andrusevich, 2014). Упомянутые исследования базируются на функциональной связи эдафических характеристик с особенностями животного населения и растительного покрова почв. Растения и животные, выполняя функцию производителей детрита, способствуют образованию гумуса, необходимого для запуска любого элементарного почвенного процесса, и оказываются его активными участниками. В свою очередь, происходит метаморфизация почвенного материала. Почва как биокостная система приспособляется к условиям своего существования в системе почвообразовательных факторов путем развития временной и пространственной гетерогенизации, формированием анизотропного строения со специфическим горизонтальным и вертикальным профилями (Soracco, 2010; Medvedev, 2013). Экологический характер преобразований горных пород, которые трансформируются в процессе биологического

этапа рекультивации, делает необходимой разработку экоморфического подхода для изучения организации почвоподобных тел, которыми являются техноземы.

При исследовании неоднородности техноземов путем измерения их твердости по регулярной сетке мы обнаружили элементы неоднородности, которые представляют собой связанные области внутри почвенного пространства, ограниченные со всех сторон субстантивной границей. В трехмерном изображении они представляют собой внегоризонтные морфологические элементы строения почвы, не описанные ни в одной из классификаций морфологических элементов почвы (Zhukov and Zadorozhnaya, 2015).

При изучении роли почвенных структур в организации растительности дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках установлен сложный характер взаимодействия растительного покрова и морфологической организации почвы. Названия почв даны по Л.В. Етеревской с соавт. (Eterevska et al., 2008). С помощью геостатистического анализа (Diggle and Ribeiro, 2000; Moncayo et al., 2006; Ramirez-Lopez et al., 2008) и построения матрицы географических расстояний (Ter Braak, 1986; Legendre and Fortin, 1989; Peres-Neto and Jackson, 2001) определено, что генератором этих взаимодействий является растительный покров, который оказывает упорядочивающее воздействие на почвенное тело. В свою очередь, структурированность почвенного тела создает разнообразие экологической ниши растительного сообщества, в рамках которой протекают динамические перестройки (Zhukov and Zadorozhnaya, 2015). Связующим звеном между структурой растительности и эдафическими свойствами являются фитоиндикационные шкалы (Diduh and Plyuta, 1991; Matveev, 2003; Zhukov, 2010; Didukh, 2011). Разрешение проблемы взаимосвязи внегоризонтных морфоструктур технозема и организации растительности мы видим в выяснении роли твердости рекультивационных почв в объяснении пространственной вариации фитоиндикационных шкал.

Понимание экологического контекста в процессах трансформации горных пород при их рекультивации требует разработки целостной концепции структурной и функциональной организации биогеоценоза как процессивного блока, который является двигателем преобразований горной породы в почвоподобное тело и в почву как конечный результат восстановительной динамики. Проблема экоморф, которая решена для биотических компонентов биогеоценоза, требует своего решения для почв, почвоподобных тел и горных пород, которые трансформируются в процессе рекультивации. Цель работы – на основе изучения пространственно-временной динамики твердости обосновать существование экоморф техноземов как внегоризонтных почвенных образований.

## Материал и методы исследований

Материал собирали в июне 2012 г. и июне 2013 г. на четырех вариантах техноземов участка рекультивации

Никопольского марганцеворудного бассейна в г. Орджоникидзе. Опытный полигон представляет собой регулярную сетку с размером ячеек 3 м и состоит из 7 трансект по 15 проб. Соответственно, размер полигона составляет 42 × 18 м. Твердость почвы измеряли в полевых условиях с помощью ручного пенетromетра Eijkelkamp на глубину до 50 см с интервалом 5 см (Grunwald et al., 2001; Cecilia et al., 2012; Bets, 2013; Zhukov and Zadorozhnaya, 2013; Moiseev, 2013). Основной рабочей частью прибора является плунжер, навинченный на нижний конец штока, который с помощью рукоятки сквозь измеряющую пружину вталкивается в исследованную почву. При этом измеряющая пружина сжимается пропорционально величине сопротивления деформации почвы. Средняя погрешность результатов измерений прибора составляет ± 8%. Измерения твердости техноземов сделаны конусом поперечного сечения 2 см<sup>2</sup> в каждой ячейке полигона.

Оценка средних показателей ( $\bar{x}$ ), стандартной ошибки (SE) и коэффициента вариации (CV) произведена с помощью инструментов описательной статистики. Для определения уровня пространственной зависимости показателей механического импеданса техноземов применялся геостатистический анализ данных (Veronese Junior et al., 2006; Webster and Oliver, 2007; Valbuena Calderon et al., 2008). Уровень пространственной зависимости (SDL, spatial dependence level, пространственное отношение) рассчитан по формуле:

$$SDL = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \times 100,$$

где  $C_0$  – наггет-эффект,  $C_1$  – частичный порог.

Показатели  $C_0$ ,  $C_1$  и радиус влияния (R) получены на основе моделирования вариограмм пространственной изменчивости твердости почвы (Legendre and Fortin, 1989; Webster and Oliver, 2007).

Степень сопряженности пространственного распределения показателей почвенного тела в разные годы исследования установлена с помощью корреляционного анализа.

## Результаты и их обсуждение

Среди изученных техноземов наименьшими значениями твердости почвы по профилю обладает педозем. Средние значения его твердости увеличиваются с глубиной и достигают значений  $6,95 \pm 0,31$  МПа в 2012 году и  $6,34 \pm 0,24$  МПа в 2013 г. на уровне 50 см вглубь от поверхности. Дерново-литогенные почвы на лессовидных суглинках, красно-бурых и серо-зеленых глинах обладают большими значениями твердости по профилю. Исключение составляют данные твердости дерново-литогенной почвы на серо-зеленых глинах верхних слоев (0–10 см от поверхности), где значение изучаемого свойства ниже, чем в соответственных слоях педозема (табл. 1).

Коэффициенты вариации твердости педозема наиболее высоки и колеблются в пределах 36,4–46,2% для данных 2012 г. и 28,7–37,0% – 2013 года. Подобной динамикой и схожими значениями CV обладают данные твердости дерново-литогенной почвы на красно-бурых глинах. Показатели твердости литоземов, образованных на серо-зеленых глинах и лессовидных суглинках, варьируют менее существенно. Дерново-литогенная почва на серо-зеленых глинах характеризуется наличием локальных максимумов коэффициента вариации на уровне 5–10 см ниже поверхности в данных 2012 г., однако ниже этого уровня вариативность данных этого субстрата сравнительно низка, как и дерново-литогенной почвы на красно-бурых глинах. Описанные закономерности характерны для показателей, полученных в оба года исследования.

Таблица 1

Описательные статистики твердости техноземов Никопольского марганцеворудного бассейна (n = 105)

Расстояние от поверхности, см	Педозем		Дерново-литогенная почва на лессовидных суглинках		Дерново-литогенная почва на серо-зеленых глинах		Дерново-литогенная почва на красно-бурых глинах	
	$\bar{x} \pm SE$ , МПа	CV, %	$\bar{x} \pm SE$ , МПа	CV, %	$\bar{x} \pm SE$ , МПа	CV, %	$\bar{x} \pm SE$ , МПа	CV, %
<i>2012 г.</i>								
0–5	3,01 ± 0,12	40,7	4,14 ± 0,17	42,2	2,16 ± 0,82	38,8	3,26 ± 0,09	29,6
5–10	4,16 ± 0,15	36,4	6,03 ± 0,22	38,7	3,63 ± 0,18	53,5	4,57 ± 0,17	39,4
10–15	4,95 ± 0,18	38,1	7,04 ± 0,24	35,2	5,25 ± 0,21	41,2	5,58 ± 0,19	35,4
15–20	5,17 ± 0,21	40,6	7,72 ± 0,25	33,1	6,28 ± 0,22	35,4	6,31 ± 0,22	36,5
20–25	5,52 ± 0,22	41,6	8,20 ± 0,26	32,7	6,80 ± 0,21	31,7	6,96 ± 0,25	37,3
25–30	5,69 ± 0,23	42,3	8,50 ± 0,27	32,2	7,35 ± 0,23	31,9	7,39 ± 0,27	38,7
30–35	5,95 ± 0,25	42,7	8,73 ± 0,30	35,1	7,67 ± 0,25	33,8	7,79 ± 0,29	38,2
35–40	6,24 ± 0,27	44,0	9,01 ± 0,31	34,8	8,21 ± 0,28	34,5	8,24 ± 0,31	40,0
40–45	6,60 ± 0,29	45,7	9,43 ± 0,33	36,8	8,81 ± 0,30	35,0	8,42 ± 0,33	41,1
45–50	6,95 ± 0,31	46,2	9,75 ± 0,35	36,9	9,33 ± 0,31	34,5	8,06 ± 0,35	42,7
<i>2013 г.</i>								
0–5	2,20 ± 0,09	41,4	2,70 ± 0,12	48,7	1,74 ± 0,08	46,1	2,09 ± 0,10	49,2
5–10	3,55 ± 0,13	38,1	5,11 ± 0,21	41,3	3,35 ± 0,12	36,7	3,94 ± 0,15	39,6
10–15	4,27 ± 0,16	37,8	6,80 ± 0,20	30,5	4,60 ± 0,13	29,7	4,89 ± 0,18	38,4
15–20	4,68 ± 0,18	38,4	7,43 ± 0,19	26,0	5,65 ± 0,16	29,0	5,31 ± 0,19	38,0
20–25	4,74 ± 0,17	35,9	7,85 ± 0,18	24,0	6,10 ± 0,17	28,7	5,43 ± 0,22	42,2
25–30	5,17 ± 0,21	40,9	8,15 ± 0,18	22,5	6,31 ± 0,15	24,1	5,90 ± 0,22	38,9
30–35	5,69 ± 0,25	44,4	8,37 ± 0,19	23,7	6,42 ± 0,15	24,5	6,18 ± 0,24	39,9
35–40	5,92 ± 0,25	42,7	8,50 ± 0,19	22,9	6,52 ± 0,16	24,6	6,45 ± 0,23	37,3
40–45	6,07 ± 0,25	42,7	8,71 ± 0,19	22,6	6,77 ± 0,17	25,1	6,79 ± 0,21	33,1
45–50	6,34 ± 0,24	39,3	8,90 ± 0,18	21,1	7,09 ± 0,16	23,6	7,04 ± 0,22	32,6

Для определения уровня зависимости взаиморасположения показателей твердости техноземов и установления факта существования почвенных экоморф необходим геостатистический анализ данных (табл. 2). При интерпретации SDL следует учитывать, что если его уровень находится в пределах 0–25%, то речь идет о сильной пространственной зависимости; если в пределах 25–75% – зависимость переменной является умеренной; если превышает 75% – переменная рассматривается как слабо пространственно зависимая (Cashbardella, 1994; Мопсауо, 2006). Согласно результатам наших исследований, данные твердости педозема, собранные в 2012 г., обладают высокой степенью пространственной зависимости в слоях 0–20 см от поверхности; ниже 20 см уровень SDL уменьшается и она характеризуется как умеренная. Анализ данных, соб-

ранных в 2013 г., показал, что высокой степенью пространственной зависимости характеризуются показатели твердости поверхностного (0–5 см) слоя педозема; данные твердости этой почвы в нижерасположенных слоях показывают умеренный SDL. В педоземе обговариваемый показатель наиболее вариативен, его значения изменяются в пределах 0,7–73,3%. Среди всех изученных техноземов самыми высокими значениями пространственной зависимости обладают данные твердости дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках за оба года исследования. Наиболее низкое пространственное отношение показали данные распределения показателей твердости дерново-литогенной почвы на серо-зеленых глинах, собранные в 2012 г., и дерново-литогенной почвы на красно-бурых глинах – в 2013 году.

Таблица 2

Геостатистические параметры пространственного варьирования твердости техноземов Никопольского марганцеворудного бассейна (n = 105)

Расстояние от поверхности, см	Педозем		Дерново-литогенная почва на лессовидных суглинках		Дерново-литогенная почва на серо-зеленых глинах		Дерново-литогенная почва на красно-бурых глинах	
	SDL	R	SDL	R	SDL	R	SDL	R
<i>2012 г.</i>								
0–5	0,68	3,03	15,13	6,83	32,84	6,05	2,09	4,49
5–10	0,41	4,04	7,88	6,22	55,87	8,24	6,60	4,31
10–15	0,26	3,51	1,20	7,08	36,92	5,92	13,07	3,52
15–20	0,21	4,30	0,16	4,10	68,77	4,31	12,81	3,34
20–25	53,57	4,45	0,14	6,64	71,74	4,31	13,09	3,79
25–30	73,26	5,59	17,82	9,69	72,34	12,23	17,13	4,06
30–35	50,72	4,12	26,59	6,77	50,84	10,70	15,61	4,30
35–40	44,72	5,00	48,59	5,05	72,34	12,23	18,96	4,11
40–45	36,60	4,56	56,00	5,50	37,89	15,89	21,29	4,19
45–50	51,71	5,86	57,14	6,71	42,99	15,48	18,92	4,04
<i>2013 г.</i>								
0–5	1,22	4,67	15,52	9,02	22,39	6,99	61,86	7,79
5–10	57,14	4,83	4,98	4,05	13,33	6,02	34,66	7,14
10–15	56,25	3,88	6,80	4,00	17,65	5,23	29,48	7,20
15–20	30,30	3,80	2,12	3,03	46,33	3,71	36,24	7,51
20–25	41,38	5,78	1,69	6,01	42,53	5,32	41,78	8,02
25–30	43,01	4,66	29,82	6,80	30,05	3,50	59,39	7,41
30–35	40,68	7,88	35,00	8,94	49,26	7,38	74,02	8,03
35–40	41,94	7,84	35,14	8,01	22,33	14,84	69,06	7,58
40–45	44,12	8,32	28,33	6,05	19,57	14,32	61,27	6,77
45–50	31,53	7,51	45,18	6,39	21,10	15,40	66,29	6,01

Примечание: SDL – уровень пространственной зависимости (%), R – радиус влияния (м).

Достоверная пространственная зависимость полученных переменных предполагает наличие неоднородности почвенного покрова изученного участка по признаку твердости. Это означает, что вокруг любой произвольной вертикальной оси может быть очерчена область, в пределах которой наблюдается взаимное влияние грунтовых масс, что ведет к дифференциации процессов преобразования и перемещения веществ и возникновения неоднородности ее свойств (Salvador-Blanes et al., 2006; Serafim et al., 2008; Crus et al., 2010; Martins et al., 2010). Чем ближе находятся обсуждаемые грунтовые массы, тем сильнее должно быть их взаимное влияние. С удалением взаимосвязь ослабевает, так как ее заглушает влияние масс, расположенных ближе. Геостатистический анализ позволяет определить расстояния, в пределах которых имеет место указанное выше взаимодействие. Этот показатель называется радиусом влияния. Его величина варьирует по сло-

ям и показывает средние линейные размеры морфологических структур, которые являются элементами неоднородности. Данные твердости педозема 2012 г. исследования демонстрируют вариацию этого показателя от 3,03 до 5,86 м, данные 2013 г. – от 3,80 до 8,32 м. С углублением прослеживается некоторое увеличение показателя радиуса влияния в педоземе. В трехмерном изображении это внегоризонтные морфологические элементы строения почвы с несколько расширяющимся основанием. Среди техноземов такой закономерностью характеризуется и дерново-литогенная почва на серо-зеленых глинах, однако здесь это явление более ярко выражено. В оба года исследования данные радиуса влияния в этом субстрате резко увеличиваются с глубиной и доходят до значений 15,40–15,48 м, что соответствует росту линейных размеров оснований экоморф дерново-литогенной почвы на серо-зеленой глине. Самый стабильный радиус влияния

имеют данные, полученные при анализе данных твердости дерново-литогенной почвы на красно-бурых глинах. Существенного изменения его величины по профилю не обнаружено ни при исследованиях в 2012 г., ни в 2013 году. Экоморфы дерново-литогенной почвы на лесовидных суглинках имеют изменчивую форму, радиус влияния данных несколько раз уменьшается и увеличивается с глубиной и колеблется в пределах 4,10–9,69 м в 2012 г. и 4,00–8,94 м в данных 2013 года.

Анализируя временные изменения строения педозема, можно отметить, что устойчивыми являются мера вариации свойства и общие закономерности их пространственного поведения, но не топография размещения элементов неоднородности, которая во времени в большей или меньшей степени меняется. Корреляционный анализ между значениями твердости техноземов в разные годы исследования тоже обнаруживает отличия в формировании неоднородности их разных типов (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции Пирсона твердости педозема в 2012 и 2013 гг. (n = 105)

Годы	2013										
	0–5	5–10	10–15	15–20	20–25	25–30	30–35	35–40	40–45	45–50	
Педозем											
2012	0–5	0,04	0,02	0,00	0,08	-0,05	-0,09	-0,03	0,05	0,01	-0,03
	5–10	0,19	0,13	0,05	0,17	0,09	0,02	0,11	0,13	0,01	0,00
	10–15	0,24*	0,20*	0,07	0,18	0,06	0,09	0,15	0,11	0,05	0,02
	15–20	0,24*	0,17	0,00	0,09	-0,06	0,00	0,12	0,06	0,01	-0,02
	20–25	0,33*	0,25*	0,04	0,10	-0,05	0,01	0,10	0,08	0,06	0,02
	25–30	0,25*	0,14	-0,04	0,05	-0,09	-0,02	0,10	0,12	0,07	0,06
	30–35	0,33*	0,16	0,00	0,10	-0,03	-0,01	0,11	0,10	0,07	0,06
	35–40	0,34*	0,16	0,02	0,08	-0,02	-0,02	0,09	0,06	0,05	0,05
	40–45	0,32*	0,16	0,04	0,10	0,01	0,01	0,12	0,07	0,05	0,04
	45–50	0,35*	0,18	0,05	0,10	0,01	0,02	0,10	0,06	0,05	0,04
	Дерново-литогенная почва на лесовидных суглинках										
0–5	0,21*	0,24*	0,16	0,13	0,15	0,19	0,24*	0,27*	0,33*	0,30*	
5–10	0,03	0,01	-0,02	-0,01	-0,01	0,02	0,08	0,10	0,18	0,21*	
10–15	0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	0,01	0,01	0,05	0,13	0,14	
15–20	-0,01	-0,00	-0,01	-0,00	-0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,07	0,12	
20–25	-0,01	-0,01	-0,04	-0,07	-0,07	-0,07	-0,04	-0,03	0,02	0,05	
25–30	0,03	-0,00	-0,03	-0,03	-0,01	0,02	0,04	0,08	0,14	0,18	
30–35	0,03	0,04	0,02	-0,00	0,03	0,05	0,03	0,09	0,14	0,18	
35–40	0,07	0,03	0,00	-0,02	0,03	0,05	0,03	0,09	0,15	0,19	
40–45	0,09	0,02	-0,02	-0,06	0,01	0,04	0,01	0,05	0,10	0,15	
45–50	0,07	0,03	0,00	-0,04	0,04	0,06	0,01	0,05	0,09	0,15	
Дерново-литогенная почва на серо-зеленых глинах											
0–5	0,29*	0,19*	-0,01	-0,01	0,04	-0,07	0,02	-0,04	-0,06	-0,07	
5–10	0,36*	0,31*	0,09	0,17*	0,09	-0,02	-0,02	0,00	0,03	-0,01	
10–15	0,41*	0,23*	0,06	0,17*	0,07	-0,05	-0,05	0,02	0,04	0,00	
15–20	0,32*	0,19*	0,10	0,20*	0,05	-0,09	-0,05	-0,03	0,06	0,05	
20–25	0,19*	0,09	0,00	0,06	-0,01	-0,19*	-0,05	-0,15*	0,06	0,09	
25–30	0,17*	0,09	0,00	0,01	-0,02	-0,20*	-0,12*	-0,18*	0,02	0,01	
30–35	0,16*	0,11	0,03	0,01	0,01	-0,16	-0,16*	-0,15*	0,01	-0,02	
35–40	0,20*	0,11	0,04	0,03	0,05	-0,13	-0,16*	-0,18*	-0,03	-0,03	
40–45	0,18*	0,12	0,07	0,05	0,09	-0,09	-0,11*	-0,15*	0,02	0,02	
45–50	0,16	0,12	0,09	0,08	0,09	-0,05	-0,15*	-0,14*	0,02	0,03	
Дерново-литогенная почва на красно-бурых глинах											
0–5	-0,10	-0,06	-0,21*	-0,21*	-0,27*	-0,23*	-0,26*	-0,25*	-0,26*	-0,35*	
5–10	-0,28*	-0,22*	-0,37*	-0,35*	-0,35*	-0,38*	-0,38*	-0,32*	-0,32*	-0,44*	
10–15	-0,30*	-0,28*	-0,36*	-0,29*	-0,31*	-0,37*	-0,37*	-0,46*	-0,37*	-0,43*	
15–20	-0,23*	-0,22*	-0,28*	-0,22*	-0,21*	-0,28*	-0,30*	-0,40*	-0,28*	-0,38*	
20–25	-0,23*	-0,27*	-0,30*	-0,23*	-0,20*	-0,26*	-0,20*	-0,30*	-0,19	-0,25*	
25–30	-0,20*	-0,24*	-0,28*	-0,23*	-0,19	-0,29*	-0,20*	-0,30*	-0,16	-0,22*	
30–35	-0,17	-0,21*	-0,25*	-0,19	-0,17	-0,27*	-0,17	-0,26*	-0,14	-0,21*	
35–40	-0,21*	-0,22*	-0,26*	-0,19	-0,17	-0,27*	-0,19	-0,29*	-0,16	-0,23*	
40–45	-0,20*	-0,22*	-0,25*	-0,18	-0,17	-0,27*	-0,18	-0,29*	-0,16	-0,23*	
45–50	-0,21*	-0,23*	-0,26*	-0,18	-0,17	-0,27*	-0,18	-0,29*	-0,15	-0,22*	

Примечание: 0–5, ..., 45–50 – расстояние от поверхности (см); \* – статистически значимые корреляции (P < 0,05).

В педоземах достоверная положительная корреляционная связь наблюдается между распределением данных изучаемого признака слоя 0–5 см, полученных в 2013 г., с распределением твердости на уровне 10–50 см от поверх-

ности, измеренного в 2012 году (P < 0,05). Распределение значений твердости слоя 5–10 см 2013 г. обнаруживает положительную связь с распределением значений в слоях 10–15 и 20–25 см 2012 года. Достоверности связи между

распределением изучаемых значений в слое 5–10 см от поверхности в 2013 г. с данными остальных слоев данных 2012 г. не наблюдается, однако коэффициенты корреляции достаточно высоки, что подчеркивает тенденцию к положительной зависимости. Иначе говоря, строение верхних слоев педозема детерминировано строением почвенного профиля на уровне 10–50 см предыдущего года. Похожие результаты показал корреляционный анализ временных изменений данных твердости дерново-литогенной почвы на серо-зеленых глинах. Формирование строения верхнего (0–5 см) слоя почвы зависит от строения практически всего почвенного профиля, наблюдавшегося в предыдущем году. Также выявлены положительные корреляционные связи распределения показателей твердости 2013 г. в слоях 5–10 и 15–20 см от поверхности с распределением изучаемого показателя на глубину до 20 см в данных 2012 года. Следы информации о прошлогоднем строении почвы на уровне 25–50 см несет в себе слой 30–40 см, однако корреляционные связи в этом случае отрицательные.

Анализ временных изменений строения дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах и лессовидных суглинках тоже выявил достоверные корреляционные связи между почвенным строением, однако связи эти иного рода. Наблюдается достоверная корреляционная зависимость строения большинства слоев профиля дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках, обнаруженного в 2013 г. от распределения показателей твердости в поверхностном слое (0–5 см от поверхности), зафиксированных в 2012 году. Положительная корреляция с распределением данных слоя 0–5 см в 2012 г. наблюдается у распределения показателя твердости в слоях 0–10 и 35–50 см 2013 года ( $P < 0,05$ ). В толще почвы 15–30 см достоверной зависимости не наблюдается, однако коэффициенты корреляции по своему значению близки к достоверным. Формирование элементов неоднородности дерново-литогенной почвы на красно-бурых глинах идет под устойчивым влиянием отрицательных обратных связей со строением данного почвенного слоя, обнаруженным в предыдущий год. Наибольшее влияние на распределение данных твердости в 2013 г. в этих субстратах имеет строение верхних слоев почвы исследованного участка, имевшего место в предыдущем году.

В результате нашего исследования установлено, что в педоземе, как и в других вариантах техноземов, существуют внегоризонтные морфологические образования – почвенные экоморфы. Линейные размеры экоморф педозема схожи с таковыми других вариантов техноземов участка рекультивации Никопольского марганцеворудного бассейна, однако, имеют своеобразную форму – тенденцию к увеличению диаметра с глубиной. Топография размещения элементов неоднородности со временем изменяется, строение верхних слоев педозема детерминировано строением почвенного профиля предыдущего года.

В почвоведении существует проблема, суть которой в несогласованности путей выделения элементов организации на субпрофильных уровнях организации и уровнях почвенно-покровных. Авторы отмечают, что в существующей классификации критерии проведения границ между элементами организации на обозначенных уровнях организации сильно разнятся между собой.

При изометричности элементов организации почвы низших уровней на горизонтном уровне организации латеральная протяженность элементов организации оказывается на многие порядки более высокой, чем по вертикальной оси. При этом отдельные горизонты в почвенном покрове нередко имеют разную латеральную протяженность. Такая постановка вопроса определяет необходимость выбора некоторого исходного почвенного тела внегоризонтного уровня, от которого можно перейти как на низшие, так и на высшие уровни организации (Zaharchenko and Zaharchenko, 2006).

Почвенные экоморфы – это целые части почвенного тела, имеющие индивидуальные параметры, характер взаимодействия, выходящие по размерам за пределы горизонтов. Обоснование их существования, по нашему мнению, решает проблему стыковки высших и низших уровней организации почвы как природного тела. Учитывая результаты исследований, опубликованных нами ранее (Zhukov and Zadorozhnaya, 2015), а также мнение других авторов о формировании растительных условий в зависимости от твердости почвы (Lipiec and Hatano, 2003; Hamza and Anderson, 2005; Capara et al., 2007; Medvedev, 2013), можно говорить, что почвенные экоморфы образуют единый функциональный комплекс с растительным сообществом. Твердость почвы взаимосвязана с ее плотностью, влажностью: в зависимости от топографии размещения участков с разной твердостью идет формирование преимущественных потоков влаги в почве, неравномерное ее смачивание, формирование трещин в местах избыточного напряжения и многообразность условий для формирования корневых систем растений, что безусловно влияет на формирование пестроты растительного покрова и урожайности (Grunwald et al., 2001; Hamza and Anderson, 2005; Ramirez-Lopez et al., 2008; Serafim et al., 2008; Cecilia et al., 2012). Путем варьирования такого свойства почвы как твердость в экосистеме создается разнообразие экологических ниш, что способствует поддержанию биоразнообразия и устойчивости экосистем. Результаты наших исследований повышают эффективность анализа отношений морфологических элементов в качестве основы детальной реконструкции процессов рекультивации, становления почв, изучения их режимов.

## Выводы

Педозем характеризуется наименьшим уровнем твердости в сравнении с данными других вариантов техноземов участка рекультивации Никопольского марганцеворудного бассейна. Наиболее высокие значения твердости зарегистрированы в дерново-литогенной почве на лессовидных суглинках.

В поверхностных слоях педозема наблюдается высокая пространственная зависимость данных твердости. С продвижением по профилю зависимость данных уменьшается до уровня умеренной. Среди всех изученных техноземов самыми высокими значениями пространственного отношения обладает распределение данных твердости дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках. Наиболее низкой пространственной зависимостью обладает распределение показателей твердости дер-

ново-литогенной почвы на серо-зеленых глинах и дерново-литогенной почвы на красно-бурых глинах.

Распределение показателей твердости верхних слоев педозема зависит от строения почвы на уровне 10–50 см, наблюдавшегося в предыдущем году. Аналогичными временными взаимосвязями обладает строение дерново-литогенной почвы на серо-зеленых глинах. Формирование элементов неоднородности литоземов на лессовидных суглинках и красно-бурых глинах происходит под влиянием строения верхнего почвенного слоя, имевшего место в предыдущем году.

Обнаружены внегоризонтные почвенные морфологические образования – почвенные экоморфы, которые в педоземе имеют тенденцию к увеличению линейных размеров с глубиной. Подобная и еще в большей степени выраженная закономерность наблюдается в строении экоморф дерново-литогенной почвы на серо-зеленых глинах. В дерново-литогенной почве на красно-бурых глинах диаметр экоморф относительно стабилен на протяжении всего изученного слоя почвы. Экоморфы дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках, напротив, имеют изменчивую форму, радиус влияния данных твердости несколько раз уменьшается и увеличивается с глубиной.

#### Библиографические ссылки

- Andrusevich, K.V., 2014. Ekomorficheskaya karakteristika mezofauny dornovo-litogennyih pochv na sero-zelenyih glinah uchastka rekultivatsii Nikopolskogo margantsevo-rudnogo basseyna [Ecomorphical characteristics of mesofauna in the sod-lithogenic soils on the grey-green clays at the nicopol manganese ore basin]. Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series Biology and Chemistry 27(2), 11–20 (in Russian).
- Bekarevich, N.E., Masyuk, N.T., 1976. Ratsionalnoe ispolzovanie nasyipnogo sloya pochvy na uchastkah rekultivatsii v chernozemnoy zone [Rational use of a bulk layer of soil on recultivation fields in chernozem region]. In: Osvoenie narushennyih zemel [Development of the destroyed lands]. Nauka, Moscow, 112–150 (in Russian).
- Belgard, A.L., 1950. Lesnaja rastitel'nost' jugo-vostoka USSR [The forest vegetation of the south east of the Ukraine]. Kiev University Press, Kiev (in Russian).
- Belgard, A.L., Travleev, A.P., 1980. Rol' pochvennoj fauny v identifikatsii jedafotopov [The role of the soil fauna in edaphotopes indication]. In: Problemy i metody biologicheskoy diagnostiki i indikatsii pochv [Problems and methods of biological soil diagnostic and indication]. Moscow State University, Moscow, 155–163 (In Russian).
- Bets, T.J., 2013. Prostranstvennaya neodnorodnost' tverdosti pochv i ee svyaz' s jelektricheskoy provodimost'ju pochvy i produktivnost'ju podsolnechnika [Spatial variability of the soil mechanical impedance and its connection with electrical conductivity and productivity of sunflower]. Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University 3(2), 30–44 (in Russian).
- Bondar, G.A., Zhukov, A.V., 2011. Jekologicheskaja struktura rastitel'nogo pokrova, sformirovannogo v rezul'tate samozarastaniya dornovo-litogennyih pochv na lessovidnyh suglinkah [Plant cover ecological structure formed as a results of self-growing of the sod-lithogenic soils on loess-like clays]. Visnik of the Dnipropetrovsk State Agrarian University 1, 54–62 (in Russian).
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., 1994. Parkin. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. 58, 1501–1511.
- Cecilia, M., Jesus, H.C., Cortes, C.A., 2012. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. Eng. Agric. Jaboticabal. 32(1), 91–101.
- Chernyishenko, V.S., Lyisenko, J.J., 2008. Jekomorficheskij analiz A.L. Bel'garda kak teoreticheskaja osnova dlja matematicheskogo prognozirovaniya dinamiki populjatsij [A.L. Belgard's ecomorph analysis as a theoretical basis for mathematical prediction of populations dynamics]. Ecology and Noospherology 19, 19–30 (in Russian).
- Crus, J.S., Assis, R.N., Matias, S.S.R., Camacho-Tamayo, J.H., Tavares, R.C., 2010. Analise espacial de atributos fisicos e carbono organico em argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-acucar. Scienc. Agrotec. 34(2), 271–278.
- Diduh, Y.P., Plyuta, P.G., 1991. Gradientnij analiz eklogichnih parametiv roslinnih ugrupovan dolini r. Vorskli (URSR) [Gradient analysis of the plant community ecologica; parameters in river Vorskla valley (UkrSSR)]. Ukr. Bot. J. 48(4), 18–23 (in Ukrainian).
- Didukh, Y.P., 2011. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. Phytosociocentre Kyiv.
- Diggle, P.J., Ribeiro, J.R., 2000. Model based geostatistics. Asociacao Brasileira de Estatistica. Sao Paulo.
- Emshanov, D.G., 1995. Pogranichnost', amficonoticheskie javlenija v lesnyh jekosistemah i ocherednye zadachi ih izucheniya [Marginality and amphicoenotic phenomenon in the forest ecosystems and further task of their investigation]. Ecology and Noospherology 1, 99–109 (in Russian).
- Eterevska, L.V., Momot, G.F., Lehtsier, L.V., 2008. Rekul'tyvovani g'runtov: Pidhody do klasyfikatsii ta systematyky [Reclaimed soils: Approaches to classification and taxonomy]. Gruntoznavstvo 9(3), 147–150 (in Ukrainian).
- Grunwald, S., McSweeney, K., Rooney, D.J., Lowery, B., 2001. Soil layer models created with profile cone penetrometer data. Geoderma 103, 181–201.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil Till. Res. 82(2), 121–145.
- Legendre, P., Fortin, M.J., 1989. Spatial pattern and ecological analysis. Vegetatio 80, 107–138.
- Lipies, J., Hatano, H., 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. Geoderma 116(1–2), 107–136.
- Martins, A.L.S., Moura, E.G., Camacho-Tamayo, J.H., 2010. Spatial variability of infiltration and its relationship to some physical properties. Ing. Investig. Bogota 30(2), 116–123.
- Matveev, N.M., 2003. Optimizatsija sistema jekomorf rastenij A.L. Bel'garda v celjah fitoindikatsii jekotopa i biotopa [The system of the A.L. Belgard ecomorphes optimization for the sake of the ecotope and biotope phytoindication]. Visn. Dnipropetr. Univ. Ser. Biol. Ecol. 11(2), 105–113 (in Russian).
- Medvedev, V.V., 2009. Tverdost' i tverdogrammy v issledovanijah po obrabotke pochv [Soild and soildgram in research on the treatment of soil]. Eurasian Soil Sci. 3, 325–336 (in Russian).
- Medvedev, V.V., 2013. Vremennaja i prostranstvennaja geterogenizatsija raspahivaemyh zemel' [Time and spatial heterogenization of soil plougher up]. Gruntoznavstvo 14, 5–22 (in Russian).
- Moiseev, K.G., 2013. Raschet plotnosti dornovo-podzolistykh supeschanyh pochv po diagrammam tverdosti [Sod-podsol sands soils density calculation on the basis of the soil penetration resistance diagrams]. Eurasian Soil Sci. 10, 1228–1233 (in Russian).
- Moncavyo, F.H., Villegas, H.A., Betancur, J.H., Tafur, L.E., 2006. Variabilidad especial de las propiedades quimicas y fisicas en un Typic Udivitrands, arenoso de la Region Andi-

- na Central Colombiana. Rev. Fac. Nal. Agr. Medelln 59, 3217-3235.
- Peres-Neto, P.R., Jackson, D.A., 2001. How well do multivariate data sets match? The advantages of a Procrustean superimposition approach over the Mantel test. *Oecologia* 129, 169-178.
- Ramires-Lopez, L., Reina-Sanchez, A., Camacho-Tamayo, J.H., 2008. Variabilidad espacial de atributos fisicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colombia. *Eng. Agric. Jaboticabal* 28(1), 55-63.
- Salvador-Blanes, S., Cornu, S., Couturier, A., King, D., Maccuire, J.J., 2006. Morphological and geochemical properties of soil accumulated in hedge-induced terraces in the Massif Central, France. *Soil Till. Res.* 85(1-2), 62-77.
- Serafim, M.E., Vitorino, A.C.T., Peixoto, P.P.P., Souza, C.M.A., Carvalho, D.F., 2008. Intervalo hidrico otimo em um latossolo vermelho distroferico sob diferentes sistemas de producao. *Eng. Agrlc. Jaboticabal* 28(4), 654-665.
- Soracco, C.G., Lozano, L.A., Sarli, G.O., Gelati, P.R., Filgueira, R.R., 2010. Anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. *Soil Till. Res.* 109, 18-22.
- Ter Braak, C.J.F., 1986. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* 67, 1167-1179.
- Valbuena Calderon, C.A., Martinez, L.J., Giraldo Henao, R., 2008. Variabilidad espacial del suelo y su relacion con el rendimiento de mango (*Mangifera indica* L.). *Rev. Bras. Frutic. Jaboticabal* 30(4), 1146-1151.
- Verones Junior, V., Carvalho, M.P., Dafonte, J., Freddi, O.S., Vidal Vazquez, E., Ingaramo, O.E., 2006. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. *Soil Till. Res.* 85, 166-177.
- Voron, Y.A., 2010. Svoystva sozdavaemoj pochvy pri poslojnoj gomotehnicheskoy i biologicheskoy rekul'tivacii [Properties of soil created by means of layerwise mine-technical and biological recultivation]. *Scientific Bulletin of National Mining University* 5, 23-28 (in Russian).
- Webster, R., Oliver, M.A., 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley and Sons. Hoboken.
- Zaharchenko, A.V., Zaharchenko, N.V., 2006. Opyt trehmer-nogo otrazhenija poverhnostej pochvennyh gorizontov v naturnyh issledovaniyah [Experience of the 3D morphometry of the soil horizons surfaces in fields investigations]. *Eurasian Soil Sci.* 2, 153-160 (in Russian).
- Zhukov, A.V., Zadorozhnaya, G.A., 2013. Prostranstvennaja izmenchivost' tverdosti pedozemov [The spatial variability of pedozem mechanical impedance]. *Biological Bulletin of Bogdan Chmel'nitskiy Melitopol State Pedagogical University* 3(1), 34-19 (in Russian).
- Zhukov, A.V., Zadorozhnaya, G.A., 2015. Fenomen pochvennoj jekomorfy [The phenomenon of soil ecomorphes]. V All-Ukrainian Congress of Ecologists. Collection of scientific abstracts. VNTU. Vinnitsia. P. 190 (in Russian).
- Zhukov, A.V., Zadorozhnaya, G.A., 2015. Rol' vnegorizontnyh pochvennyh morfostruktur v organizacii rastitel'nosti der-novo-litogennyh pochv na ljossovidnyh suglinkah (Nikopol'skij margancevorudnyj bassejn) [The role of the horizon-over morphological structures in vegetation organization of the sod-lithogenic soils on loess-like clays (Nikopol Manganese Ore Basin)]. *The Journal of V.N. Karazin Khar-kiv National University. Series: Biology* 24, 171-186 (in Russian).
- Zhukov, O.V., 2010. Ekomorfy Bel'garda - Akimova ta ekologichni matryci [Belgard - Akimov's ecomorfes and ecological matrix]. *Ecology and Noospherology* 21(3), 109-111 (in Ukrainian).

20.01.2016