

... ФІЗИОЛОГІЯ РОСЛИН ... PLANT PHYSIOLOGY ...

УДК: 631.4

Роль внегоризонтных почвенных морфоструктур в организации растительности дерново-литогенных почв на лёссовидных суглинках (Никопольский марганцево-рудный бассейн) А.В.Жуков, Г.А.Задорожная

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара (Днепропетровск, Украина)
zadorozhnaya_galina@list.ru*

Исследована динамика пространственной неоднородности дерново-литогенной почвы на лёссовидных суглинках участка рекультивации Никопольского марганцеворудного бассейна в течение двух лет по показателям твердости. Установлены статистические закономерности формирования почвенного строения. Методами геостатистики определены уровни пространственной зависимости показателей твердости по слоям на глубину 50 см. На основе послойного картографирования пространственного распределения твердости в строении дерново-литогенной почвы на лёссовидных суглинках выявлены внегоризонтные морфологические образования с горизонтальными линейными размерами от 4,10–9,69 м в 2012 году и 3,22–9,10 м в 2013 году. Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о том, что конфигурация морфологических элементов, выявленная в строении почвы в 2013 году, формируется под влиянием распределения показателей твердости в поверхностном слое 2012 года ($p < 0,05$). Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере взаимодействия растительного покрова и морфологической организации почвы. Пространственные паттерны, которые количественно отображаются в терминах геостатистик либо корреляции с матрицей географических расстояний, возникают как результат «длинных» взаимодействий. 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 растительного покрова.

Ключевые слова: *твердость почвы, пространственная неоднородность, строение почвы, морфологические элементы.*

Роль позагоризонтних ґрунтових морфоструктур в організації рослинності дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках (Нікопольський марганцево-рудний басейн) О.В.Жуков, Г.О.Задорожна

Досліджена динаміка просторової неоднорідності твердості дерново-літогенного ґрунту на лесоподібних суглинках ділянки рекультивції Нікопольського марганцеворудного басейну протягом двох років за показниками твердості. Встановлено статистичні закономірності формування будови ґрунту. Методами геостатистики визначено рівні просторової залежності показників твердості по шарах на глибину 50 см. На основі пошарового картографування просторового розподілу твердості в будові дерново-літогенного ґрунту на лесоподібних суглинках виявлені позагоризонтні морфологічні утворення з горизонтальними лінійними розмірами від 4,10–9,69 м в 2012 році і 3,22–9,10 м у 2013 році. Результати кореляційного аналізу свідчать про те, що конфігурація морфологічних елементів, що була виявлена в будові ґрунту у 2013 році, формується під впливом розподілу показників твердості поверхневого шару у 2012 році ($p < 0,05$). Отримані результати свідчать про складний характер взаємодії рослинного покриву та морфологічної організації ґрунту. Просторові паттерни, які кількісно відображаються в термінах геостатистик або кореляції з матрицею географічних відстаней, виникають як результат «довгих» взаємодій. Генератором цих взаємодій є рослинний покрив, що впливає на ґрунтове тіло. У свою чергу, структурованість ґрунтового тіла створює розмаїтість екологічної ніші рослинного угруповання, у рамках якої протікають динамічні перебудови рослинного покриву.

Ключові слова: *твердість ґрунту, просторова неоднорідність, будова ґрунту, морфологічні елементи.*

Role of the horizon-over morphological structures in vegetation organization of the sod-lithogenic soils on loess-like clays (Nikopol manganese ore basin)

A.V.Zhukov, G.A.Zadorozhnaya

The spatial heterogeneity dynamic of soil penetration resistance of sod-lithogenic soils on loess-like clays of a rehabilitation land in the Nikopol manganese ore basin has been studied within two years. Statistical regularities have been established in the formation of soil structure. The levels of spatial dependence of soil penetration resistance have been defined by means of geostatistical methods within layers to a depth of 50 cm. Horizon-over morphological formations with horizontal linear dimensions of 4,10–9,69 m in 2012 and 3,22–9,10 m in 2013 have been identified on the basis of the layered mapping of the spatial distribution of penetration resistance in the structure of sod-lithogenic soils on loess-like clays. The results of correlation analysis indicate that the configuration of the morphological elements identified in the structure of the soil in 2013 is influenced by the distribution of penetration resistance in the surface layer 2012 ($p < 0.05$). Spatial patterns which are quantitatively displayed in terms of geostatistics or correlations with a matrix of geographical distances, arise as result of "long" interactions. The generator of these interactions is the vegetative cover which has ordering influence on a soil body. In turn, structure of a soil body creates a variety of ecological niches of vegetative community in which dynamic reorganizations of a vegetative cover proceed.

Key words: *soil penetration resistance, spatial heterogeneity of soil structure, morphological elements.*

Введение

Почва является иерархической многоуровневой системой, каждый уровень которой имеет свою элементарную структуру, являющуюся для исследователей непосредственным объектом изучения (Дмитриев, 2001; Миньковский, 1995; Фридланд, 1984). Множество элементов каждого уровня находится в закономерных отношениях и связях друг с другом, что дает элементарным структурам нового уровня особые свойства, не присущие ни элементам более низких уровней, ни их сумме. Выделение уровней удобно с точки зрения исследования строения почвы как сложного природного явления и достаточно давно используется почвоведомы при изучении строения почвы (Воронин, 1979). По мнению С.В.Мейна и Ю.А.Шрейдера, четко проведенная классификация одновременно подытоживает результаты предшествующего развития данной отрасли познания и вместе с тем отмечает начало нового этапа в ее развитии. Такая классификация обладает большой эвристической силой, позволяя предсказать существование неизвестных ранее объектов или вскрыть новые связи и зависимости между уже известными объектами (Мейн, Шрейдер, 1976).

Существующая концепция уровней структурной организации почвы послужила основанием для дальнейших исследований, углубивших наши представления о природе строения почвы. При изучении пространственной изменчивости твердости антропогенных почв, созданных в результате рекультивации после добычи полезных ископаемых открытым способом, нами обнаружен новый для почвоведения класс морфоструктур (Жуков, Задорожна, 2015). Это цельные 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 (Дмитриев, 2001). Авторы отмечают, что в существующей классификации критерии проведения границ между элементами организации на субпрофильном уровне организации и уровне почвенно-покровном 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 (Розанов, 2004; Захарченко, 2004).

В нашей предыдущей работе (Жуков, Задорожна, 2015) мы описали результаты исследования пространственно-временных изменений твердости дерново-литогенных почв на серо-зеленых глинах. Градиентный характер границ между обнаруженными нами внегоризонтными морфоструктурами позволил сделать нам вывод о том, что они являются естественными элементами организации почвы как природного тела.

Важным является установить факт существования структуры и оценить её роль. Мы предполагаем существование внегоризонтных морфоструктур, а также наличие у них

функциональной роли в экосистеме, в том числе в аспекте пространственной организации растительности. Связующим звеном между структурой растительности и эдафическими свойствами являются фитоиндикационные шкалы (Didukh, 2011). Разрешение проблемы взаимосвязи внегоризонтных почвенных морфоструктур и организации растительности мы видим в выяснении роли твердости почвы в объяснении пространственной вариации фитоиндикационных шкал.

Целью настоящей работы является выяснение роли внегоризонтных внутрипочвенных морфоструктур в технозёмах в пространственной организации растительности дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках участка рекультивации Никопольского марганцево-рудного бассейна.

Методика

Сбор материала проводился 20 июня 2012 и 13 июня 2013 гг. на участке рекультивации Никопольского марганцево-рудного бассейна в г. Орджоникидзе. В качестве субстрата была выбрана дерново-литогенная почва на лессовидных суглинках. Название почвы дано по Л.В.Етеревской и соавт. (Етеревська та ін., 2008).

Опытный полигон представляет собой регулярную сетку с размером ячеек 3 м и состоит из 7 трансект по 15 проб. Соответственно его размеры составляют 42 м × 18 м.

Измерение твердости почв проводится 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 сквозь измеряющую пружину вталкивается в исследованную почву. При этом измеряющая пружина сжимается пропорционально величине сопротивления деформации почвы (Kozlov, 2012). 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). Фитоиндикационная оценка градаций экологических факторов проведена по Г.Н.Бузук и О.В.Созинову (Бузук, Созинов, 2009).

При статистических расчетах была использована программа Statistica 7.0, для оценки геостатистических показателей, двухмерного и трехмерного картографирования – программа Surfer 8.0.

Результаты и обсуждение

Описательные статистики твердости дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках выявляет общие закономерности, обнаруженные во время исследований как в 2012, так и в 2013 гг. (табл. 1).

Средние значения твердости увеличиваются с глубиной и достигают величин 9,40 и 8,44 МПа в 2012 и 2013 годах соответственно. Твердость поверхностного и приповерхностного слоев выше в 2012 году, что, скорее всего, связано с более засушливыми климатическими условиями июня 2012 года по сравнению с июнем 2013 года. По данным некоторых авторов (Faechner et al., 2000; Bathke et al., 1992), при значении твердости в 5 МПа корень растения не может преодолеть сопротивления почвы и останавливается в росте, что, безусловно, отрицательно сказывается на первичной продуктивности экосистемы. По нашим данным, такие высокие значения встречаются на глубине от 10 см до 40 см дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках в 2012 году и от 15 до 40 см в 2013 году. На рис. 1 показан подпочвенный рельеф – поверхность раздела почвенной массы по твердости при граничном критерии в 5 МПа.

Выбранный граничный критерий в 5 МПа отражает предел проникающей возможности корневых систем растений и зоны активного передвижения почвенных животных (Медведев, 2009). Кроме того, контраст твердости внутри почвы может быть маркером водоупора, который выполняет направляющую функцию в перераспределении и движении воды в почве. Поэтому подпочвенный рельеф, ограниченный поверхностью почвы, определяет объем почвенной массы, доступной для активной жизнедеятельности почвенных животных и корневых систем растений. «Долины» подпочвенного рельефа организуют движение воды в почве и миграции солей в почвенном профиле (Демидов и др., 2013).

Коэффициент вариации твердости почвы наиболее высок для данных из поверхностного слоя изученной почвы (табл. 1). Это вполне закономерно, так как почва поверхностных слоев поддается воздействию большего количества факторов, которые влияют на ее неоднородность. Ими являются

атмосферные явления, жизнедеятельность растений и животных, антропогенные воздействия. Наиболее высокие коэффициенты вариации значений твердости поверхностного слоя наблюдались и у дерново-литогенных почв на серо-зеленых глинах (Жуков, Задорожна, 2015).

Таблица 1.

Описательные статистики твердости почвы

	2012 г.				2013 г.			
	Среднее ± ст. ошибка	Доверительный интервал		CV, %	Среднее ± ст. ошибка	Доверительный интервал		CV, %
		-95%	+95%			-95%	+95%	
Твердость на глубине, см								
0–5	4,25±0,16	3,70	4,58	46,13	2,74±0,12	2,37	3,03	29,60
5–10	6,08±0,20	5,45	6,63	32,40	4,99±0,18	4,58	5,64	23,83
10–15	6,87±0,21	6,42	7,67	11,60	6,55±0,17	6,28	7,33	27,59
15–20	7,54±0,22	7,07	8,37	11,00	7,06±0,15	6,94	7,92	25,23
20–25	7,92±0,23	7,52	8,88	6,15	7,32±0,13	7,38	8,33	19,90
25–30	8,30±0,22	7,81	9,19	25,25	7,60±0,13	7,68	8,61	21,58
30–35	8,46±0,24	7,96	9,51	29,41	7,82±0,14	7,87	8,87	15,75
35–40	8,74±0,24	8,22	9,80	27,53	7,97±0,16	8,01	8,99	23,79
40–45	9,12±0,25	8,56	10,29	27,70	8,24±0,17	8,22	9,21	27,75
45–50	9,40±0,26	8,85	10,66	32,07	8,44±0,17	8,43	9,38	24,27
Фитоиндикационные шкалы по Я.П.Дидуку (Didukh, 2011)*								
Hd	7,87±0,012	7,85	7,90	1,54	7,84±0,013	7,81	7,86	1,71
fll	7,35±0,012	7,32	7,37	1,68	7,40±0,018	7,36	7,43	2,54
Rc	8,74±0,010	8,72	8,76	1,21	7,42±0,016	7,39	7,45	2,18
Sl	7,57±0,008	7,55	7,59	1,08	7,10±0,008	7,08	7,11	1,10
Ca	9,97±0,010	9,95	9,99	1,01	9,72±0,011	9,70	9,74	1,11
Nt	5,34±0,014	5,31	5,36	2,67	5,10±0,019	5,07	5,14	3,86
Ae	5,19±0,009	5,18	5,21	1,73	5,13±0,006	5,12	5,14	1,18
Tm	9,96±0,008	9,95	9,98	0,83	10,04±0,011	10,02	10,06	1,10
Om	11,78±0,010	11,76	11,80	0,89	12,03±0,012	12,00	12,05	1,00
Kn	9,12±0,016	9,09	9,16	1,85	8,85±0,016	8,82	8,88	1,82
Cr	9,00±0,007	8,99	9,01	0,79	9,28±0,010	9,26	9,30	1,14
Lc	9,48±0,019	9,45	9,52	2,08	9,08±0,001	9,07	9,08	0,14

Примечание: * – условные обозначения – в тексте.

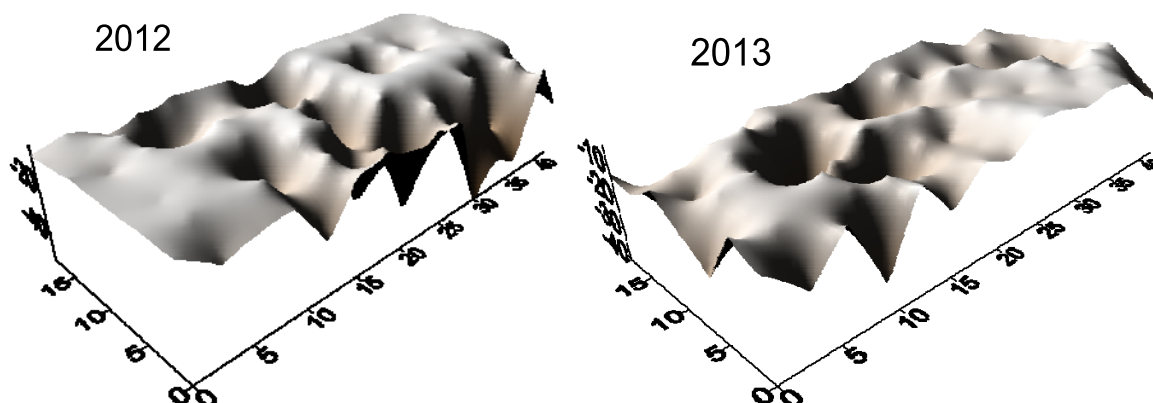


Рис. 1. Рельеф твердости дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках в 2012 и 2013 годах при граничном критерии в 5 Мпа

Вариативность показателей твердости почв уменьшается по мере продвижения вниз по профилю до глубины 25–35 см, затем снова возрастает. Отмеченные закономерности характерны для данных твердости дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках в 2012 году и 2013 году. Возможно, причиной этому является граница раздела субстрата на данной глубине изученной почвы. На рис. 2 представлена фотография почвенного разреза, сделанного в октябре 2012 года на изученном участке. Видно, что слой лессовидного суглинка на глубине 35–37 см замещается глинистым субстратом, визуально похожим на красно-бурую глину, отсыпанным при создании участка рекультивации 50 лет назад (Демидов и др., 2013).

Анализ фитоиндикационных оценок растительности показал, что по режиму увлажнения (Hd) эдафотоп изучаемого участка можно охарактеризовать как среднестепной (по Цыганову) или субсерофитный (по Дидуку). По режиму изменчивости увлажнения (ffl) эдафотоп является гемигидроконтрастным – характерный для суховатых лесолуговых и лугостепных экотопов с неравномерным увлажнением корнеобитаемого слоя почвы при умеренном или незначительном его промачивании осадками и талыми водами (Didukh, 2011). Кислотный режим (Rc) является нейтротрофным – кисловатые или нейтральные почвы. Солевой режим (Sl) является семиэвтрофным – небогатые солями почвы с содержанием гидрокарбонатов и следами сульфат-ионов и хлоридов. По содержанию карбонатов (Ca) исследуемые почвы являются гемикарбонатными. По содержанию усвояемых форм азота (Nt) в сообществе преимущественно представлены геминитрофилы, которые произрастают на среднебогатых минеральным азотом почвах. По режиму аэрации (Ae) почвы изучаемого полигона относятся к категории субаэрофильных – значительно аэрированные почвы с включением щебня горных пород. Фитоиндикация указывает на неморальный терморезим (Tm) с радиационным балансом 49,8–50,2 ккал/см*см*год. По шкале омброрезима (Om), которая показывает степень аридности-гумидности климатических условий, микроклимат данного участка можно оценить как субаридофитный. Режим континентальности (Kn) можно оценить как гемиконтинентальный. Криорезим (Cr) является гемикриофитным. Режим освещения (Lc) – гелиофитный, который характерен для открытых местообитаний (Didukh, 2011).



Рис. 2. Профиль дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках участка рекультивации Никопольского марганцево-рудного бассейна

Применение геостатистического анализа позволило выявить закономерности пространственного распределения показателей твердости почвы (табл. 2).

Таблица 2.

Геостатистические параметры твердости почвы

	2012 г.					2013 г.				
	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	SDL, %	Радиус влияния, м	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	SDL, %	Радиус влияния, м
Твердость на глубине, см										
0–5	0,41	2,3	2,71	15,13	6,8	0,25	1,36	1,61	15,52	9,00
5–10	0,42	4,91	5,33	7,88	6,22	0,21	4,00	4,22	4,98	4,00
10–15	0,07	5,75	5,82	1,20	7,10	0,30	4,11	4,41	6,80	4,00
15–20	0,00	6,14	6,14	0,16	4,10	0,08	3,70	3,78	2,12	3,00
20–25	0,00	7,05	7,05	0,14	6,64	0,06	3,48	3,54	1,69	6,01
25–30	1,31	6,04	7,35	17,82	9,69	1,02	2,4	3,42	29,82	6,80
30–35	1,96	7,37	9,33	26,59	6,77	1,40	2,60	4,00	35,00	8,94
35–40	5,01	5,30	10,31	48,59	5,05	1,30	2,40	3,70	35,14	8,01
40–45	7,00	5,50	12,50	56,00	5,50	1,00	2,53	3,53	28,33	6,00
45–50	8,00	6,00	14,00	57,14	6,70	1,50	1,82	3,32	45,18	6,40
Фитоиндикационные шкалы по Я.П.Дидуку (Didukh, 2011)										
Hd	0,40	1,14	1,54	25,78	6,60	10,10	4,00	14,10	71,63	10,40
ffi	0,34	1,21	1,55	21,95	6,81	17,10	22,30	39,40	43,40	27,70
Rc	0,72	0,41	1,13	64,02	8,02	9,48	15,00	24,48	38,71	15,61
Sl	0,03	0,52	0,55	4,71	5,96	4,50	1,00	5,50	81,82	15,89
Ca	0,67	0,30	0,97	69,21	6,65	7,64	2,21	9,85	77,57	14,24
Nt	1,26	0,80	2,06	61,18	5,40	15,76	21,00	36,76	42,87	15,42
Ae	0,50	0,30	0,80	62,47	5,13	2,36	1,02	3,38	69,78	36,25
Tm	0,27	0,40	0,67	40,64	9,03	7,40	4,20	11,60	63,79	14,74
Om	0,61	0,46	1,07	56,86	15,58	8,36	6,62	14,98	55,81	14,10
Kn	1,55	1,40	2,95	52,49	9,33	10,74	14,44	25,18	42,65	11,64
Cr	0,19	0,25	0,44	43,32	6,49	5,45	7,32	12,77	42,66	16,30
Lc	0,17	3,50	3,67	4,60	5,13	0,06	0,10	0,16	34,83	13,86

Примечание: C₀ – наггет; C₁ – частичный порог; SDL – уровень пространственной зависимости (*spatial dependence level*) ($100 \cdot C_0 / (C_0 + C_1)$).

Наггет-эффект отражает непространственную компоненту изменчивости признака и увеличивается с глубиной. Его отношение к показателю «порог» позволяет оценить уровень пространственной зависимости по пространственному отношению SDL. Если пространственное отношение находится в пределах 0–25 %, то речь идет о сильной пространственной зависимости; если пространственное отношение находится в пределах 25–75 %, в таком случае пространственная зависимость переменной является умеренной; если пространственное отношение превышает 75%, то переменная рассматривается как слабо пространственно зависимая (Cambardella et al., 1994). Согласно нашим данным, высоким уровнем пространственной зависимости обладает распределение показателей твердости в верхней половине слоев изученной толщи почвы (0–35 см в 2012 году, 0–25 см в 2013 году). Слои почвы, расположенные ниже, имеют умеренную пространственную зависимость распределения изучаемой переменной, что согласуется с данными наггет-эффекта. Фитоиндикационные шкалы характеризуются преимущественно высокой и средней степенью пространственной зависимости в 2012 г., а в 2013 г. показатели пространственной зависимости характеризуются отчетливым трендом её снижения.

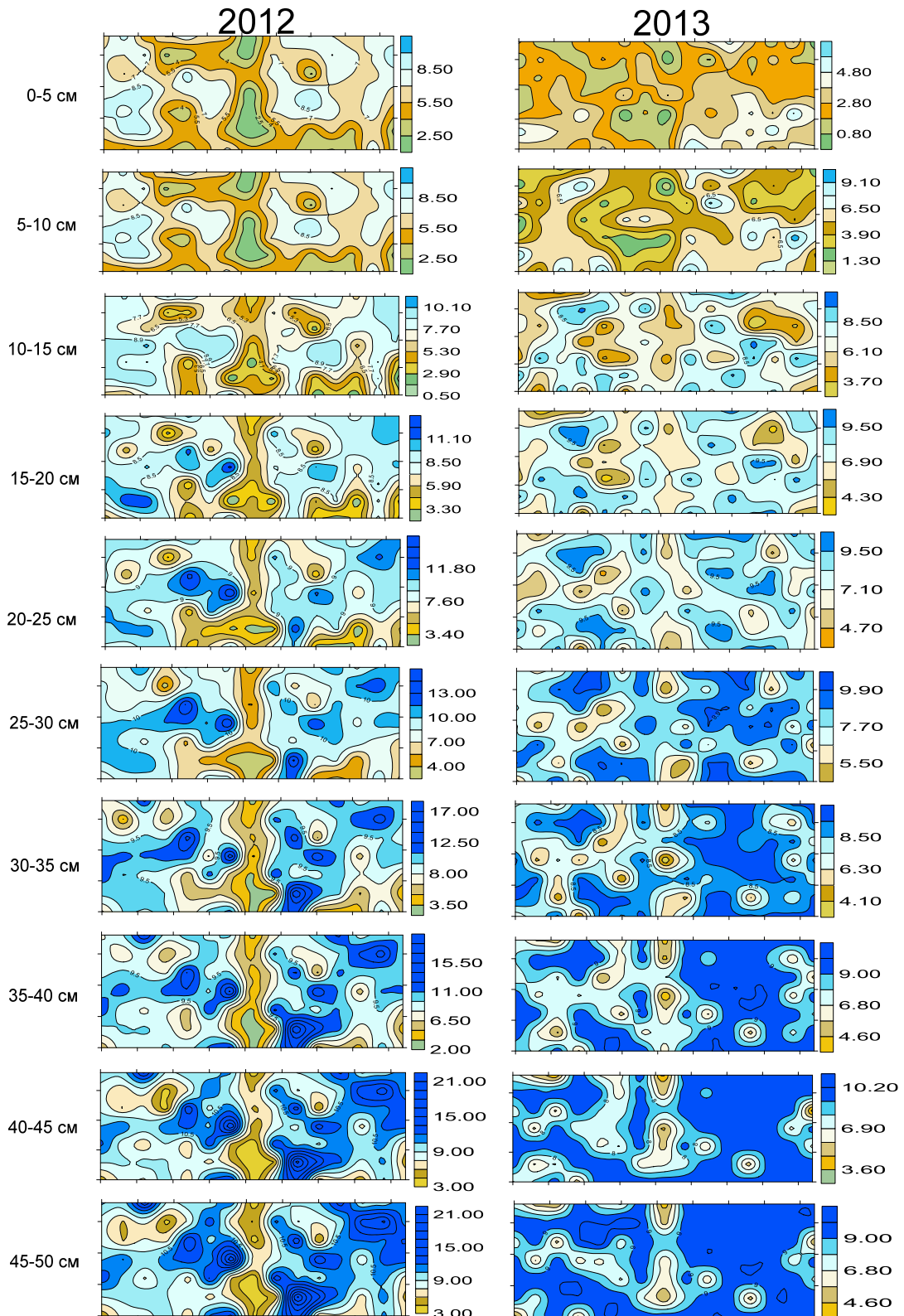


Рис. 3. Карты пространственного распределения показателей твердости по слоям в 2012 и 2013 годах

Примечание: 0–5, ..., 45–50 см – расстояние от поверхности вглубь почвы.

Необходимо отметить, что показатель пространственной зависимости явления или процесса отражает не только его свойства, но и соответствие масштаба отбора проб размерности пространственного процесса. Ключевой причиной снижения формальной оценки пространственной зависимости может быть выход за пределы разрешающей способности стратегии отбора проб пространственных структур изучаемого явления или процесса. Выход для решения такого рода проблем – адаптивная стратегия отбора проб (Жуков и др., 2012; Балюк и др., 2014).

Радиус влияния – это расстояние, в пределах которого наблюдается взаимосвязь между точками пространства по изучаемому признаку. Этот показатель отражает средние линейные размеры морфологических структур, являющихся элементами неоднородности. Для фитоиндикационных шкал радиус влияния в 2012 г. в среднем составил 7,51 м (диапазон изменчивости – 5,13–15,58 м), а в 2013 г. – 17,18 м (10,40–36,25 м). Для показателей твердости его величина колеблется в пределах 4,10–9,69 м в 2012 году и 3,22–9,10 м в 2013 году. Карты, представленные на рис. 3, позволяют визуализировать эти морфоэлементы (рис. 3).

На представленных картах послойного распределения твердости можно увидеть, что показатели твердости в изученной толще почвы обладают структурой пространственного распределения. Однородные области размещаются, часто повторяясь, взаимонакладываясь, образуют в той или иной степени структурно индивидуальные объекты, отделенные от смежного почвенного пространства градиентными границами. С продвижением вглубь рисунок последовательно меняется и дает возможность увидеть, как изменяется форма выделенных объектов. Светлые участки – это места, где почва менее твердая. Вероятнее всего, по ним осуществляется преимущественное движение потоков влаги. При визуальном исследовании четко видно, что строение почвы в 2012 и 2013 году хоть и проявляет некоторое сходство, но не является идентичным. Особенно хорошо различие заметно по местам повышенной твердости.

Для точного определения меры сходства – различия между строением почвы в разные годы исследования был проведен корреляционный анализ. Его результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3.

Коэффициенты корреляции Пирсона твердости почвы в 2012 и 2013 гг. (полу жирным выделены значимые коэффициенты $p < 0,05$)

		2013									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2012	1	0,21	0,24	0,16	0,13	0,15	0,19	0,24	0,27	0,33	0,30
	2	0,03	0,01	-0,02	-0,01	-0,01	0,02	0,08	0,10	0,18	0,21
	3	0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	0,01	0,01	0,05	0,13	0,14
	4	-0,01	-0,00	-0,01	-0,00	-0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,07	0,12
	5	-0,01	-0,01	-0,04	-0,07	-0,07	-0,07	-0,04	-0,03	0,02	0,05
	6	0,03	-0,00	-0,03	-0,03	-0,01	0,02	0,04	0,08	0,14	0,18
	7	0,03	0,04	0,02	-0,00	0,03	0,05	0,03	0,09	0,14	0,18
	8	0,07	0,03	0,00	-0,02	0,03	0,05	0,03	0,09	0,15	0,19
	9	0,09	0,02	-0,02	-0,06	0,01	0,04	0,01	0,05	0,10	0,15
	10	0,07	0,03	0,00	-0,04	0,04	0,06	0,01	0,05	0,09	0,15

Примечание: 1, ..., 10 – твердость почвы на глубине 0–5, ..., 45–50 см.

Данные корреляционного анализа показывают, что имеется связь строения большинства слоев профиля дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках, обнаруженного в 2013 году, с распределением показателей твердости в поверхностном слое, зафиксированных в 2012 году. Положительная корреляция с распределением данных слоя 0–5 см в 2012 году наблюдается у распределения показателя твердости в слоях 0–10 и 35–50 см 2013 года. В толще почвы 15–30 см достоверной зависимости не наблюдается, однако коэффициенты корреляции по своему значению

близки к достоверным ($p < 0,05$). Отчетливо видно, что формирование строения почвы идет под прямым влиянием областей с повышенной и пониженной твердостью ее поверхностного слоя, существовавшего в предыдущем году.

Для оценки связи между показателями твердости и структурой растительного сообщества, выраженной в терминах фитоиндикационных шкал, проведен канонический анализ соответствий (Ter Braak, 1986) (рис. 4).

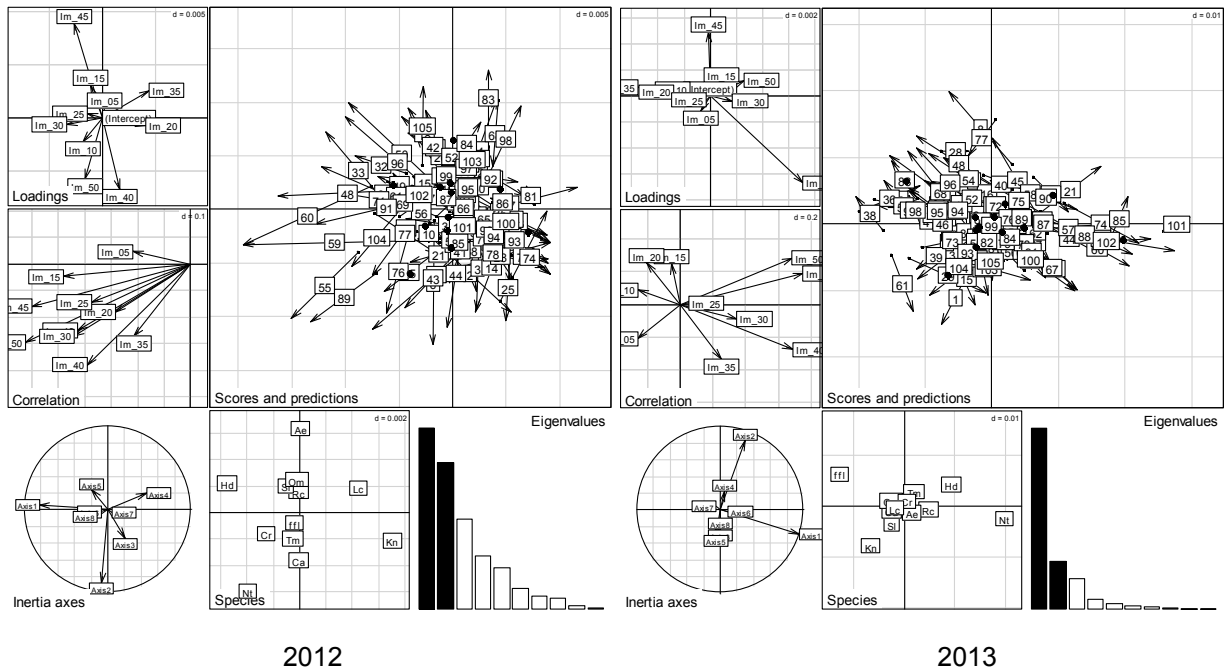


Рис. 4. Канонический анализ соответствий фитоиндикационных шкал с показателями твердости почвы, как показатели свойств среды

Условные обозначения: см. рис. 6.

Анализ был проведен для данных за два года отдельно. Собственные числа указывают на то, что в 2013 г. более чётко выделяется тренд, обозначенный осью 1 (оси 1 и 2 описывают 64,11 и 16,82% общей инерции), тогда как в 2012 различия между собственными числами 1 и 2 не столь велики (оси 1 и 2 описывают 31,17 и 26,13% общей инерции), что свидетельствует о наличии двух существенных трендов в структурировании растительного сообщества. В 2012 г. ось 1 маркирует изменчивость твердости по всему профилю, а ось 2 – противоположную динамику между твердостью в поверхностных слоях (0–5 см) с одной стороны и более глубоких (35–50 см) – с другой. Ось 1 тесно связана с изменчивостью в пределах полигона фитоиндикационных шкал Hd, Nt, Lc, Kn, а ось 2 – Ae, Ca и Nt. В 2013 г. ось 1 по своим свойствам соответствует оси 2 2012 г.: она противопоставляет изменчивость твердости в слоях 0–20 см изменчивости в слоях 25–50 см. Из фитоиндикационных шкал с осью 1 в 2013 г. связаны в наибольшей степени Hd, Nt и ffl.

Таким образом, аспект структурирования комплекса растительность – почвенное тело, который занимал второстепенное положение в 2012 г., выходит полностью на первый план в 2013 г. и практически полностью вытесняет по своей значимости остальные тренды вариабельности структуры растительности и твердости почвы.

Вопрос о соответствии паттернов взаимосвязи растительности и твердости почвы решен с помощью Прокрустова анализа (Peres-Neto, Jackson, 2001) (рис. 5).

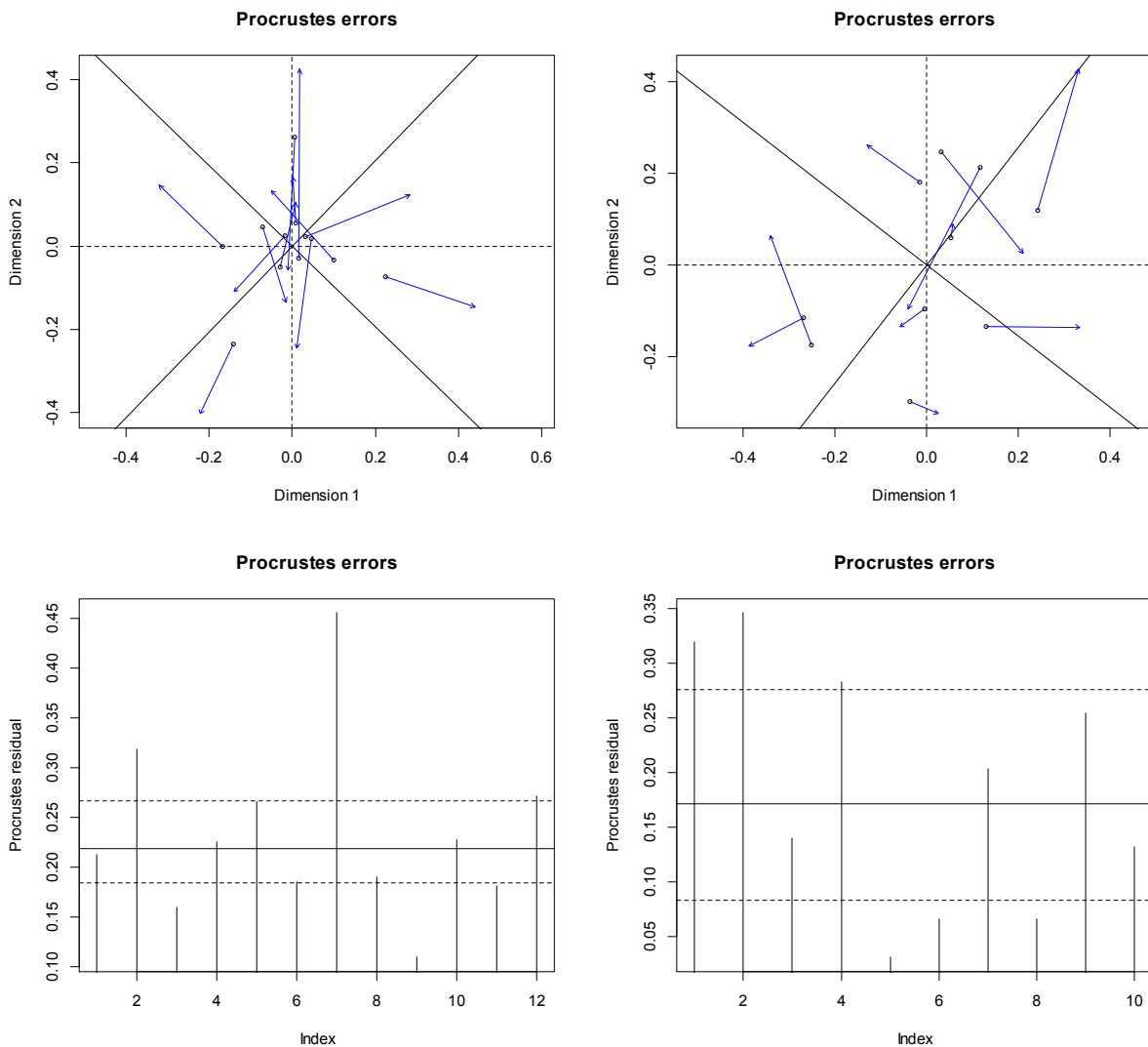


Рис. 5. Прокрустов анализ ординационных решений за 2012 и 2013 гг.

Примечания: слева – проекции фитоиндикационных шкал, справа – показателей твердости; сверху – вращение ординационных осей, внизу – Прокрустовы остатки по переменным (порядок переменных соответствует табл. 1).

Корреляция симметричного Прокрустова вращення ординационного рішення для фитоіндикаційних шкал становить 0,51 ($p=0,05$), а для показателів твердості – 0,74 ($p=0,01$). Отримані результати свідчать про наявність інваріантної компоненти взаємозв'язку між твердістю і фитоіндикаційними шкалами, що дозволяє нам об'єднати результати за два роки і провести канонічний аналіз відповідностей для консолідованої вибірки (рис. 6).

Для консолідованої вибірки ось 1 відображає річні різниці. Слід зауважити, що ця ось маркує, перш за все, фитоіндикаційні показники (Тм, Ае, Лс, Ом). Примітливо, що шкали є переважно кліматичними (шкала Ае формально є едафічною, але рівень ґрунтової аерації сильно залежить від режиму вологості, а таким чином – від кількості опадів). Таким чином, можна передбачати, що різниці між двома роками дослідження визначаються переважно кліматичними факторами. Ось 2 відображає інваріантну відносно часу компоненту взаємозалежності структурно-морфологічної організації ґрунтового тіла і рослинності. Ця залежність характеризує узгоджену динаміку переважно едафічних фитоіндикаційних шкал, таких як Нд, Нт, Са, Кп. В

аспекте твердости почвы инвариантная компонента прежде всего связана с обратной динамикой твердости на малой глубине с одной стороны (0–5 см, в меньшей степени 5–10, ..., 15–20 см) и на большей глубине (25–50 см) – с другой.

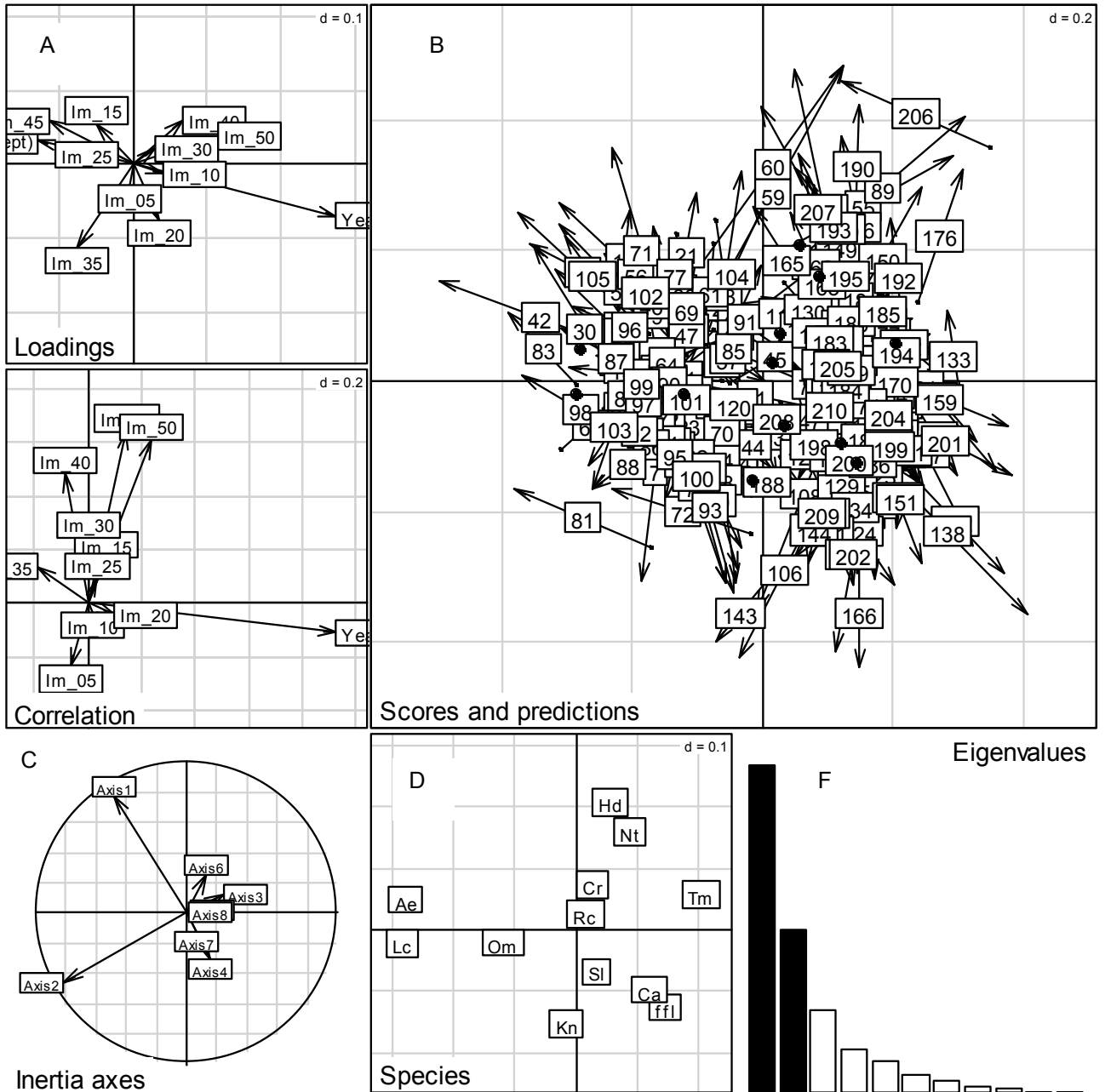


Рис. 6. Канонический анализ соответствий фитоиндикационных шкал с показателями твердости почвы как показатели свойств среды (данные за 2012 и 2013 гг. совместно)

Условные обозначения: А – канонические коэффициенты, определяющие ординационные оси как линейные комбинации переменных среды; В – коэффициенты корреляции между переменными среды и осями ординации; С – корреляция фитоиндикационных осей и осей факторов среды; D – корреляция фитоиндикационных шкал и ординационных осей, F – относительные значения собственных чисел ординационных осей; Year – маркер года.

На рис. 7 представлены векторные карты изменчивости значений осей 1 и 2 во времени.

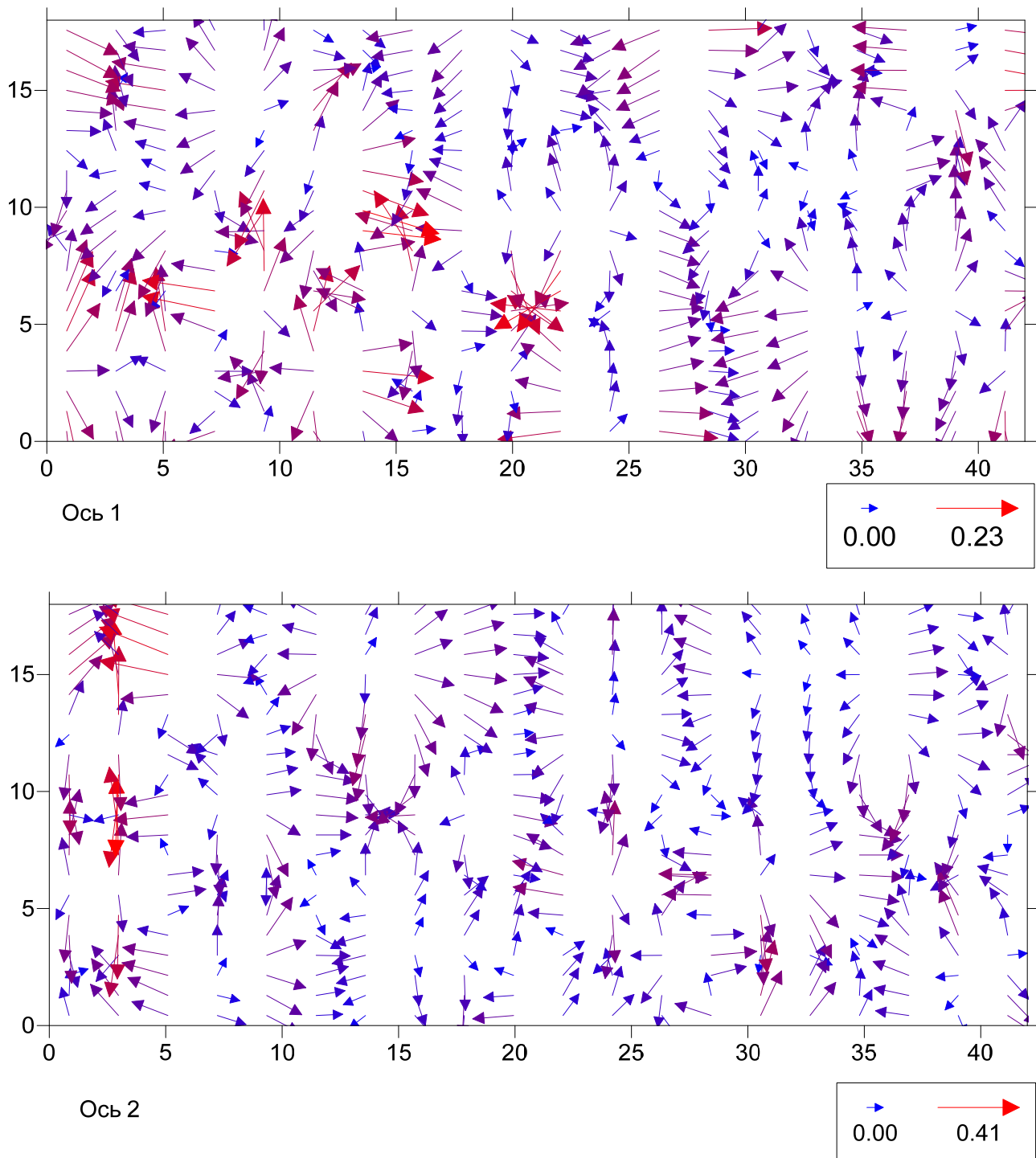


Рис. 7. Векторні діаграми изменчивости значений осей 1 и 2 во времени (2012–2013 гг.)

Векторная форма представления наглядно отображает динамические тренды изменчивости взаимоотношений в системе морфологическая организация почвенного тела – растительный покров. Необходимо отметить, что пространственная компонента изменчивости оси 1 (разницы значений в данной точке в 2012 и 2013 гг.) очень низкая (SDL=83,08%, модель Гаусса, радиус влияния – 10,19 м). Для оси 2 пространственная компонента изменчивости существенно выше (SDL=36,86%, сферическая модель, радиус влияния – 15,70 м).

Оценка корреляций матриц мер расстояния между изучаемыми признаками может быть проведена с помощью теста Мантеля (табл. 4).

Корреляции матриц расстояний (тест Мантеля)

Таблица 4.

Тест Мантеля	Частный тест Мантеля, управляющая переменная	Твердость, 2013	Шкалы, 2012	Шкалы, 2013	Координаты
Твердость, 2012	–	$r=0,07$, $p=0,082$	$r=0,05$, $p=0,139$	$r=0,11$, $p=0,011$	$r=0,00$, $p=0,525$
	Координаты	–	–	$r=0,11$, $p=0,009$	–
	Твердость, 2013	–	–	$r=0,10$, $p=0,020$	–
Твердость, 2013	–	–	$r = -0,03$, $p = 0,681$	$r=0,26$, $p=0,001$	$r=0,01$, $p=0,370$
	Координаты	–	–	$r=0,26$, $p=0,009$	–
	Твердость, 2012	–	–	$r=0,25$, $p=0,001$	–
Шкалы, 2012	–	–	–	$r=0,03$, $p=0,289$	$r=0,11$, $p=0,002$
	Твердость, 2012	–	–	–	$r=0,11$, $p=0,001$
Шкалы, 2013	–	–	–	–	$r=0,17$, $p=0,001$
	Твердость, 2012	–	–	–	$r=0,17$, $p=0,001$
	Твердость, 2013	–	–	–	$r=0,17$, $p=0,001$

Полученные данные свидетельствуют о том, что между матрицами твердости почвы за два года существует очень низкая корреляция ($r=0,07$, $p=0,082$). Этот результат полностью соответствует материалам графического отображения пространственных паттернов (рис. 3) и геостатистического анализа (табл. 2). Важно отметить, что между матрицей расстояний по твердости и фитоиндикационным шкалам в 2012 г. нет корреляции ($r=0,05$, $p=0,139$), тогда как матрицы твердости 2012 г. и фитоиндикационных шкал 2013 г. между собой коррелируют ($r=0,11$, $p=0,011$). Для понимания причин корреляции может быть проведен частный тест Мантеля. Связь между матрицами может быть прямой либо опосредованной третьим фактором. Матрица этого фактора рассматривается как управляющая переменная. Если частный тест Мантеля имеет меньшее значение, чем общий, тогда управляющий фактор является причиной корреляции, которая выявляется общим тестом (Legendre, Fortin, 1989). Частные тесты Мантеля между твердостью 2012 г. и фитоиндикационными шкалами 2013 г. с географическими координатами и твердостью 2013 г. как управляющие переменные практически не отличаются от полных тестов Мантеля, что говорит об отсутствии роли этих управляющих переменных в установленной связи.

Твердость и фитоиндикационные шкалы в 2013 г. сильно коррелируют ($r=0,26$, $p=0,001$), при этом управляющие переменные твердость 2012 г. и географические координаты на эту связь не оказывают влияния.

Фитоиндикационные шкалы в 2012 и 2013 гг. характеризуются статистически достоверной корреляцией с матрицей географических расстояний.

Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере взаимодействия растительного покрова и морфологической организации почвы. Безусловным «драйвером» процесса является растительность. Пространственные паттерны, которые количественно отображаются в терминах

геостатистик либо корреляции с матрицей географических расстояний, возникают как результат «длинных» взаимодействий. 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 растительного покрова.

Твердость – это интегральный показатель физического состояния почвы. С твердостью связаны такие показатели, как плотность, аэрация, водный обмен, противодействие росту растений, роющей деятельности животных, геоморфологическая устойчивость почвенного покрова (Медведев, 2009; Демидов и др., 2013; Жуков, Коновалова, 2011; Бондарь, Жуков, 2011). Компоненты почвы с различной твердостью обладают различными физико-механическими свойствами. Они по-разному изменяются при набухании, усадке либо расширении, что проявляется и в изменении формы поверхности почвы, она становится волнистой. На выраженных геоморфологических склонах может увеличиваться скорость горизонтального смещения почвенного покрова и также наблюдаться волнообразное искривление поверхности почвы (Жуков, Кунах, 2011; Демидов и др., 2013). Изменения формы почвенного микрорельефа вследствие закономерных различий твердости приводят к усилению контрастности перераспределения влаги между микроstationами, что создает условия для мозаичной структуры покрова. Все вышесказанное дает нам основания полагать, что обговариваемые структурные элементы имеют прямое отношение к поддержанию биогеоценотического покрова путем формирования разнообразия экологических ниш.

По Г.М.Миньковскому (Миньковский, 1995), почвенный покров есть совокупность независимо распределенных (в той или иной степени сопряженных) морфоэлементов. Каждый морфологический элемент имеет свой индивидуальный ареал в пространстве и в системе градиентов среды. Их существование опосредовано окружающими их почвенными элементами, образующимися совместно в результате почвообразовательного процесса, протекающего в центре определенной совокупности факторов. Структурная целостность, индивидуальность, зависимость от экологических условий дает основание отнести обнаруженные нами эдафические структурные элементы к разряду почвенных экоморф.

Ближайшим результатом применения полученных знаний есть пополнение наших сведений о почвенных морфологических элементах, повышение качества морфологической характеристики почв, избавление от пробелов в иерархической системе морфологических элементов почвы. Эти сведения послужат основой для совершенствования принципов и приемов морфологического описания почв, дадут возможность дальнейшей разработки классификации почвенных морфологических элементов, обеспечивая ее полноту. На основании данных размера, особенностей формы, динамики изменений во времени, их роли в рассматриваемой почвенной системе возможно применение знания об открытых эдафических структурных элементах в качестве одного из оснований классификации почв и их диагностики.

Выводы

1. Средние значения твердости дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках закономерно увеличиваются с глубиной от 4,14 до 9,75 МПа в 2012 году и от 2,70 до 8,90 в 2013 году. Значения твердости в 5 МПа встречаются на глубине от 10 см до 40 см в данных 2012 года и от 15 до 40 см в 2013 году. Коэффициент вариации полученных данных твердости наиболее высок в поверхностном слое изученной почвы (46,13% в данных 2012 года, 29,60% в данных 2013 года).

2. Данные корреляционного анализа показывают, что имеется связь строения большинства слоев профиля дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках, обнаруженного в 2013 году, с распределением показателей твердости в поверхностном слое профиля 2012 года. Распределение показателя твердости в слоях 0–10 и 35–50 см, обнаруженное в 2013 году, имеет положительную корреляцию с распределением данных слоя 0–5 см 2012 года ($p < 0,05$).

3. Полученные данные твердости почв обладают высокой и средней степенью пространственного отношения. Высоким уровнем пространственной зависимости обладает распределение показателей твердости в верхней половине слоев изученной толщи почвы (0–35 см в 2012 году, 0–25 см в 2013 году). Слои почвы, расположенные ниже, имеют умеренную пространственную зависимость распределения изучаемой переменной.

4. На основе послыного картографирования пространственного распределения твердости в строении дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках выявлены внегоризонтные

морфологические образования с горизонтальными линейными размерами 4,10–9,69 м в 2012 году и 3,22–9,10 м в 2013 году.

5. Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о том, что конфигурация морфологических элементов, выявленная в строении почвы в 2013 году, формируется под влиянием распределения показателей твердости в поверхностном слое 2012 года ($p < 0,05$).

6. Обнаруженные нами элементы пространственной организации дерново-литогенной почвы на лессовидных суглинках обладают собственными размерами, формой, характером взаимосвязи, могут называться элементами неоднородности почвы и являются естественными элементами организации почвы как природного тела. Структурная целостность, индивидуальность, зависимость от экологических условий дает основание отнести обнаруженные нами эдафические структурные элементы к разряду почвенных экоморф.

7. Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере взаимодействия растительного покрова и морфологической организации почвы. Пространственные паттерны, которые количественно отображаются в терминах геостатистик либо корреляции с матрицей географических расстояний, возникают как результат «длинных» взаимодействий. 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 растительного покрова.

Список литературы

- Балюк Ю.А., Кунах О.Н., Жуков А.В. и др. Адаптивная стратегия отбора проб для оценки пространственной организации сообществ почвенных животных урбанизированных территорий на различных иерархических уровнях // Биологический вестник Мелитопольского государственного педагогического университета имени Богдана Хмельницкого. – 2014. – №4 (3). – С. 8–33. /Balyuk Yu.A., Kunakh O.N., Zhukov A.V. i dr. Adaptivnaya strategiya otbora prob dlya otsenki prostranstvennoy organizatsii soobshchestv pochvennykh zhyvotnykh urbanizirovannykh territoriy na razlichnykh iyerarkhicheskikh urovnyakh // Biologicheskii vestnik Melitopols'kogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni Bogdana Khmel'nitskogo. – 2014. – №4 (3). – С. 8–33./
- 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. /Bondar' G.A., Zhukov A.V. Ekologicheskaya struktura rastitel'nogo pokrova, sformirovannogo v rezul'tate samozarastaniya dernovo-litogennykh pochv na lessovidnykh suglinkakh // Visnyk Dnipropetrovs'kogo derzhavnogo agrarnogo universytetu. – 2011. – №1. – С. 54–62./
- Бузык Г.Н., Созинов О.В. Регрессионный анализ в фитоиндикации (на примере экологических шкал Д.Н.Цыганова) // Ботаника (исследования): Сб. науч. трудов. / Ин-т эксперимент. бот. НАН Беларуси. – Минск: Право и экономика, 2009. – Вып.37. – С. 356–362. /Buzuk G.N., Sozinov O.V. Regressionnyy analiz v fitoindikatsii (na primere ekologicheskikh shkal D.N.Tsyganova) // Botanika (issledovaniya): Sb. nauch. trudov. / In-t eksperiment. bot. NAN Belarusi. – Minsk: Pravo i ekonomika, 2009. – Vyp.37. – С. 356–362./
- Воронин А.Д. Методологические принципы и методическое значение концепции иерархии уровней структурной организации почвы // Вестник Моск. ун-та. Сер. почвовед. – 1979. – №1. – С. 3–10. /Voronin A.D. Metodologicheskiye printsypy i metodicheskoye znacheniye kontseptsii iyerarkhii urovney strukturnoy organizatsii pochvy // Vestnik Mosk. un-ta. Ser. pochvoved. – 1979. – №1. – С. 3–10./
- Демидов А.А., Кобец А.С., Грицан Ю.И., Жуков А.В. Пространственная экология и рекультивация земель. – Днепропетровск: изд-во «Свидлер А.Л.», 2013. – 560с. /Demidov A.A., Kobets A.S., Gritsan Yu.I., Zhukov A.V. Prostranstvennaya ekologiya i rekultivatsiya zemel'. – Dnepropetrovsk: Izd-vo «Svidler A.L.», 2013. – 560s./
- Дмитриев Е.А. Теоретические и методологические проблемы почвоведения. – М.: ГЕОС, 2001. – 374с. /Dmitriyev Ye.A. Teoreticheskiye i metodologicheskiye problemy pochvovedeniya. – M.: GEOS, 2001. – 374s./
- Єтеревська Л.В., Момот Г.Ф., Лехтсієр Л.В. Рекультивовані ґрунти: підходи до класифікації і систематики // Ґрунтознавство. – 2008. – Т.9, №3. – С. 147–150. /Yeterevs'ka L.V., Momot G.F., Lekhtsiyer L.V. Rekultivovani grunty: pidkhody do klasyfikatsiyi i systematyky // Gruntoznavstvo. – 2008. – T.9, N3. – С. 147–150./
- Жуков О.В., Задорожна Г.О. Екоморфічна організація ґрунтового тіла: Геостатистичний підхід // Біологічні Студії / Studia Biologica. – 2015. – Т.9, № 3–4. – С. 119–128. /Zhukov O.V., Zadorozhna G.O. Ekomorfichna organizatsiya gruntovogo tila: Geostatystychnyy pidkhid // Studia Biologica. – 2015. – T.9, № 3–4. – С. 119–128./
- Жуков А.В., Задорожна Г.А., Андрусевич Е.В. Оптимальная стратегия отбора почвенных образцов на основании данных об электрической проводимости техноземов // Біологічний вісник МДПУ ім. Б.Хмельницького. – 2012. – №4. – С. 64–80. /Zhukov A.V., Zadorozhnaya G.A., Andrusевич Ye.V. Optimalnaya strategiya otbora pochvennykh obraztsov na osnovanii dannykh ob elektricheskoy provodimosti tekhnomezov // Biologicheskii vestnik Melitopols'kogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni Bogdana Khmel'nitskogo. – 2012. – №4. – С. 64–80./

- Жуков А.В., Коновалова Т.М. Пространственная изменчивость электропроводности почвы под воздействием роющей активности слепышей на различных масштабных уровнях // Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Медицина. – 2011. – Вип.2, т.2. – С. 34–41. /Zhukov A.V., Konovalova T.M. Prostranstvennaya izmenchivost' elektroprovodnosti pochvy pod vozdeystviyem royushchey aktivnosti slepyshey na razlichnykh masshtabnykh urovnyakh // Visnyk Dnipropetrovs'kogo universytetu. Biologiya. Medytsyna. – 2011. – Vyp.2, t.2. – S. 34–41./
- Жуков А.В., Кунах О.Н. Твердость дерново-літогенних почв на лессовидних суглинках // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2011. – №1. – С. 63–69. /Zhukov A.V., Kunakh O.N. Tverdost' dornovo-litogennykh pochv na lessovidnykh suglinkakh // Visnyk Dnipropetrovs'kogo derzhavnogo agrarnogo universytetu. – 2011. – №1. – S. 63–69./
- Захарченко А.В. Метод трехмерной морфометрии почв // Вестник Томского государственного университета. – 2004. – №30. – С. 50–57. /Zakharchenko A.V. Metod trekhmernoy morfometrii pochv // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2004. – №30. – S. 50–57./
- Медведев В.В. Твердость почвы. – Харьков: изд-во КП «Городская типография», 2009. – 152с. /Medvedev V.V. Tverdost' pochvy. – Khar'kov: izd-vo KP «Gorodskaya tipografiya», 2009. – 152s./
- Мейн С.В., Шрейдер Ю.А. Методологические аспекты теории классификации // Вопросы философии. – 1976. – №12. – С. 67–79. /Meyn S.V., Shreyder Yu.A. Metodologicheskiye aspekty teorii klassifikatsii // Voprosy filosofii. – 1976. – №12. – S. 67–79./
- Миньковский Г.М. Структурный подход в почвоведении // Почвоведение. – 1995. – №7. – С. 9–18. /Min'kovskiy G.M. Strukturnyy podkhod v pochvovedenii // Pochvovedeniye. – 1995. – №7. – S. 9–18./
- Розанов Б.Г. Морфология почв: учебник для высшей школы. – Москва: Академический проект, 2004. – 431с. /Rozanov B.G. Morfologiya pochv: uchebnik dlya vysshey shkoly. – Moskva: Akademicheskii proekt, 2004. – 431s./
- Фридланд В.М. Структуры почвенного покрова мира. – М.: Мысль, 1984. – 239с. /Fridland V.M. Struktury pochvennogo pokrova mira. – M.: Mysl', 1984. – 239s./
- Bathke G.R., Cassel D.K., Hargrove W.L., Porter P.M. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat // Soil Science. – 1992. – Vol.154. – P. 316–328.
- Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M. et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils // Soil Science Soc. Am. – 1994. – Vol.58. – P. 1501–1511.
- Didukh Ya.P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication – Kyiv: Phytosociocentre, 2011. – 176p.
- Faechner T., Pyrcz M.J., Deutsch C.V. Prediction of Yield Response to Soil Remediation // Geoderma. – 2000. – Vol.97. – P. 21–38.
- Legendre P., Fortin M.J. Spatial pattern and ecological analysis // Vegetatio. – 1989. – Vol.80. – P. 107–138.
- Peres-Neto P.R., Jackson D.A. How well do multivariate data sets match? The advantages of a Procrustean superimposition approach over the Mantel test // Oecologia. – 2001. – Vol.129. – P. 169–178.
- Ter Braak C.J.F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis // Ecology. – 1986. – Vol.67. – P. 1167–1179.

Представлено: Г.Г.Сидоренко / Presented by: G.G.Sidorenko

Рецензент: А.С.Усиченко / Reviewer: A.S.Usichenko

Подано до редакції / Received: 26.02.2015