



УДК 631.618:633.2.031

А. В. Жуков, Г.А.Задорожная

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТВЕРДОСТИ ПЕДОЗЕМОВ*Днепропетровский государственный аграрный университет*

Изучена пространственная изменчивость твердости педозема научно-исследовательского стационара по рекультивации Днепропетровского государственного аграрного университета в г. Орджоникидзе. Установлено, что распределение показателей твердости почвы на изученном участке характеризуется отклонением от нормального в слоях 0–10 и 30–50 см от поверхности, что говорит о и появлении на этом уровне качественной неоднородности изучаемого признака. С помощью двух- и трехмерного моделирования показаны структурные почвенные конструкции как локалитеты повышенной твердости, находящиеся в почвенном материале меньшей твердости.

Ключевые слова: твердость почвы, пространственная неоднородность почвенных свойств, рекультивация.

О.В.Жуков, Г.О.Задорожна

ПРОСТОРОВА МІНЛИВІСТЬ ТВЕРДОСТІ ПЕДОЗЕМІВ*Дніпропетровський державний аграрний університет*

Вивчена просторова мінливість твердості педозема науково-дослідного стаціонару по рекультивації Дніпропетровського державного аграрного університету в м. Орджонікідзе. Встановлено, що розподіл показників твердості на вивченому ділянці ґрунту характеризується відхиленням від нормального в шарах 0–10 і 30–50 см від поверхні, що говорить про появі на цьому рівні якісній неоднорідності досліджуваного ознаки. За допомогою двох-і тривимірного моделювання показані структурні ґрунтові конструкції як локалітети підвищеної твердості, що знаходяться в ґрунтовому матеріалі меншою твердості.

Ключові слова: твердість ґрунту, просторова мінливість ґрунтових властивостей, рекультивація

A.V. Zhukov, G. O. Zadorozhnaya

SPATIAL VARIABILITY OF PEDOZEMS MECHANICAL IMPEDANCE*Dnipropetrovsk State Agrarian University*

We studied the spatial variability of pedozem mechanical impedance in Research Remediation Center of the Dnipropetrovsk State Agrarian University in Ordzhonikidze. The statistical distribution of the soil mechanical impedance within the studied area is characterized by deviation from the normal law in 0–10 and 30–50 cm layers from the surface. 2D and 3D modeling shows the structural design of the soil as locations of high mechanical impedance which found in the soils with less hardness.

Key words: the hardness of the soil, the spatial heterogeneity of soil properties, land reclamation.

Пространственная вариабельность почвенных свойств почв является важнейшим элементом, необходимым для лучшего понимания факторов, формирующих структуру почв (Красильников, 2007). Геостатистика, за счет своих интерпретационных возможностей, выступает в качестве метода познания объекта, инструмента анализа данных (Дмитриев, 2010). Концептуальные инструменты, заимствованные из точных наук, помогают привести к единому знаменателю и гармонизировать сведения о сложных объектах, которыми являются почвенные типы, почвенные тела и почвенные ландшафты. Актуальный объект для исследования в этом направлении – молодые почвы рекультивационных земель (Узбек и др., 2010). Их можно рассматривать как систему, выведенную из равновесного состояния, где процессы в своем стремлении к устойчивости проявляют тенденцию к ускорению.

Варьирование почвенных признаков достаточно хорошо изучено на уровне агрохимических свойств, (это в основном содержание химических элементов и их соединений) и рассматривается исследователями в пределах одного почвенного горизонта или какого-либо однородного почвенного контура – педона, элементарного почвенного ареала (Узбек и др., 2010). Варьирование физических свойств почвы изучено гораздо меньше, не смотря на то, что физическими взаимодействиями почвенных отдельностей определяется структура почвенного покрова, многие генетические и агропроизводственные характеристики.

Твердость почвы как физическая характеристика является показателем ее способности в естественном сложении сопротивляться сжатию и расклиниванию.

Как экологический фактор твердость оказывает механическое воздействие на развивающуюся корневую систему растений, часто определяет изменение условий прорастания семян, влияет на водный, воздушный и тепловой режимы почвы (Медведев, 2010, 2009). Изучение пространственной неоднородности твердости почвы с помощью геостатистики поможет оценить количественную сторону данного явления и дать возможность рассуждать о совокупном действии порождающих его сил на конструктивной основе.

Целью настоящего исследования является изучение пространственной организации педоземов по данным о пространственной изменчивости их твердости.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работы проведены на научно-исследовательском стационаре Днепропетровского государственного аграрного университета в г. Орджоникидзе. Экспериментальный участок по изучению оптимальных режимов рекультивации был создан в 1968 – 1970 гг. Отбор проб произведен на



варианте техноземов с насыпным слоем чернозема мощностью 0,5 м на технической смеси глин (географические координаты юго-западного угла полигона – 47°38'55.24"С.Ш., 34°08'33.30"В.Д.).

Полигон представлен 8 трансектами, каждая из которых состоит из 20 точек отбора проб. Трансекты расположены в направлении с запада на восток с интервалом 1,5 м между соседними трансектами. Точки отбора проб также находятся с интервалом 1,5 м. Таким образом, экспериментальный полигон представляет собой регулярную сетку с шириной ячейки 1,5 м. Длина большей стороны полигона равна 28,5 м, меньшей – 10,5 м.

Измерение твердости почв производились в полевых условиях с помощью ручного пенетromетра Eijkelkamp на глубину до 50 см с интервалом 5 см. Средняя погрешность результатов измерений прибора составляет $\pm 8\%$. Измерения производились с конусом, размер поперечного сечения которого составлял 1 см². В пределах каждой ячейки измерения твердости почвы производились в однократной повторности.

Статистические расчеты проведены с помощью программы Statistica 7.0, двухмерное картографирование и оценка геостатистических показателей выполнены с помощью программы Surfer 8.0, оценка I-статистики Морана произведена с помощью программы GeoDa 0.9.5-i (<http://geodacenter.asu.edu/>).

Для проведения 3-D геостатистического анализа использовалась программа S-GeMS (<http://sgems.sourceforge.net/>).

3-D вариограмма была представлена двумя вложенными структурами. Первая анизотропная сферическая вариограмма с наибольшим диапазоном 4,8 м (направлен горизонтально), средним – 2,4 м (направлен горизонтально) и минимальным – 0,4 м (направлен перпендикулярно к первым двум) описывает изменчивость твердости почвы в преимущественно горизонтальном направлении. Вторая анизотропная сферическая вариограмма с наибольшим диапазоном 0,5 м (перпендикулярен к поверхности почвы) и нулевыми средним и минимальным диапазонами описывает изменчивость твердости почвы в вертикальном направлении.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для обобщения данных, полученных в ходе исследования, мы использовали описательную статистику. Цель описательной статистики – обработка эмпирических данных, их систематизация, количественное описание посредством основных статистических показателей к которым относят среднее, медиану, статистическое отклонение, асимметрию и эксцесс распределения и т.д. Описательные статистики показателя изученного участка почвы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Описательные статистики твердости педозема (в МПа)

Твердость на глубине	Средн ее	Медиа на	Ст. от кл.	Асиммет рия	Эксце сс	CV, %	d
0–5 см	2,25	2,40	0,56	–1,32	3,32	25,00	0, 18
5–10 см	2,53	2,60	0,48	–1,01	3,62	18,88	0, 10
10–15 см	2,74	2,75	0,63	0,07	3,38	22,91	0, 10
15–20 см	2,90	2,80	0,81	0,88	1,05	28,01	0, 11
20–25 см	3,20	3,00	1,31	1,45	2,76	40,95	0, 14
25–30 см	3,69	3,40	1,85	1,03	0,92	50,09	0, 12
30–35 см	4,50	4,20	2,26	0,47	–0,69	50,24	0, 11
35–40 см	5,50	5,20	2,72	0,19	–1,29	49,39	0, 11
40–45 см	6,40	6,70	2,83	–0,14	–1,35	44,14	0, 12
45–50 см	7,24	7,80	2,66	–0,50	–1,04	36,74	0, 18

Примечание: d – статистика Колмогорова–Смирнова

Среднее значение твердости почвы закономерно увеличивается с глубиной залегания слоя от $2,25 \pm 0,56$ в верхнем горизонте до $7,24 \pm 2,66$ на глубине 50 см м от поверхности почвы. Порог твердости в 3 МПа, когда корневые волоски уже не могут преодолевать сопротивление почвы, достигается на глубине 15 см локально и на глубине 20–25 см уже на большинстве изученной территории. Самая высокая вариабельность признака наблюдается в слоях почвы 25–40 см, здесь коэффициент вариации достигает уровня 50 %, в то время как в слое 5–10 см он составляет всего лишь 19 %.

С помощью таких показателей как медиана, асимметрия и эксцесс можно сравнивать фактическое распределение признака по изученному участку с нормальным законом. Медиана является важной характеристикой распределения случайной величины и так же, как среднее значение, может быть использовано для центрирования распределения, однако она меньше подвержена влиянию выбросов и других отклонений в исследуемой величине. Поэтому медиана часто может быть более предпочтительной для изучения распределений с так называемыми «тяжелыми хвостами» чем среднее значение



признака. В нашем исследовании медиана несколько отличается от среднего значения твердости в слоях почвы, однако динамика изменения носит тот же характер. Значения медианы колеблются от 2,40 до 7,80 МПа и с глубиной закономерно увеличиваются.

Статистическое отклонение – наиболее распространенный показатель рассеивания значений случайной величины относительно её математического ожидания. В нашем случае статистическое отклонение показателей твердости почвы, как и предыдущие показатели, увеличивается с глубиной, что вполне закономерно.

Коэффициент асимметрии в теории вероятностей – величина, характеризующая асимметрию распределения данной случайной величины. Он положителен, если правый хвост распределения длиннее левого, и отрицателен в противном случае. Коэффициент эксцесса – мера остроты пика распределения случайной величины – часто используется для предварительной проверки на нормальность. Эксцесс есть степень крутости эмпирического распределения по отношению к нормальному закону. Показатели асимметрии и эксцесса характеризуют непосредственно форму распределения признака в пределах изучаемой совокупности, но их определение имеет не только описательное значение. Появление значительного отрицательного эксцесса может указывать на качественную неоднородность исследуемой совокупности. Вероятность появления асимметричности и эксцесса выборки означает усложнение пространственной структуры свойства.

Наибольшее значение (по модулю) показателя асимметрии и эксцесса статистического распределения твердости изученной почвы наблюдается в слоях 0–10 см и 20–25 см от поверхности, причем эксцесс положителен до глубины 30 см, а от 35 до 50 см его значения отрицательны. Принимая во внимание статистику Колмогорова–Смирнова, можно говорить о том, что распределение показателей твердости в нашем исследовании достоверно не отличается от нормального, однако имеет тенденцию к уплощению кривой распределения в слоях ниже 30 см. Такое распределение отражает существование значительной территории на глубине 30–50 см с относительно невысокой твердостью, в пределах которой вкраплены локалитеты с твердостью повышенной. Также обращают на себя внимание показатели твердости верхних исследованных слоев почвы (0–5 и 5–10 см от поверхности). Распределение изучаемого признака здесь характеризуется значениями медианы большими, чем значения среднего, самыми высокими показателями эксцесса и отрицательной асимметрией. Все это свидетельствует об отклонении распределения полученных показателей от нормального и появлении качественной неоднородности изучаемого признака в верхних слоях почвы изученного участка. Полученные результаты соответствуют данным

других авторов (Красильников, 2007). Согласно устоявшимся представлениям, наибольшей неоднородностью обладает поверхностный горизонт почвы, а наименьшей – почвообразующая порода. Авторы объясняют это континуальностью глубоких слоев и ландшафтной дискретностью верхних, где за счет нулевых значений возрастает вариабельность.

С целью отражения пространственной организации изучаемого явления мы применяли геостатистику. Такие показатели как наггет-эффект, частичный порог, пространственное отношение (SDL), радиус влияния определяются с помощью вариограммы. Вариограмма в геостатистике служит для количественного описания пространственной непрерывности и моделирования пространственной корреляции. График вариограммы показывает зависимость между дисперсией признака в определенных местоположениях и расстоянием между последними. Эта зависимость используется для предсказания значений в других местоположениях методом кригинга, то есть при пространственной интерполяции. Геостатистические параметры распределения твердости почвы исследованного участка представлены в таблице 2.

Наггет-эффект указывает на значимость непространственной компоненты изменчивости признака и отражает неоднородность признака, меньшую, чем шаг расчета вариограммы. Совместный учет частичного порога (пространственной компоненты изменчивости) и наггет-эффекта позволяет оценить уровень пространственной зависимости (показатель SDL, или пространственное отношение). Этот показатель изменяется от 0 до 100 %. Если пространственное отношение находится в пределах 0–25 %, то речь идет о сильной пространственной зависимости; если пространственное отношение находится в пределах 25–75 %, то в таком случае пространственная зависимость переменной является умеренной; когда пространственное отношение превышает 75 %, переменная рассматривается как слабо пространственно зависимая (Faechner, 2000). В нашем эксперименте величина показателя SDL растет с глубиной. Значения наггет-эффекта тоже достигают максимума в самых глубоких слоях изученной толщи почвы. Исходя из этого можно говорить, что формирование неоднородности по изучаемому признаку имеет более сильную зависимость от расположения в пространстве в верхних горизонтах изученного слоя почвы. Отклонение от нормального распределения говорит о том, что в этих слоях почвы формирование пространственной неоднородности твердости идет под ярко выраженным направленным воздействием определенного фактора или нескольких факторов. Ограничение числа последних облегчает задачу установления причин, порождающих эту неоднородность.

Таблица 2. Геостатистические параметры твердости педозема



Глубина измеря- емого слоя	Модель	C_0 (Нагге- т)	C_1 (Част- ичный порог)	C_0+C_1 (Поро- г)	$SDL, \%$	Радиус влияни- я, м	I - Мора на	p - уровень
0–5 см	Сфериче- ская	1,87	0,60	2,47	43,09	9,34	0,06	0,11
5–10 см	Сфериче- ская	1,20	0,55	1,75	68,57	9,90	0,20	0,00
10–15 см	Гауссова	1,94	1,08	3,04	63,86	14,31	0,11	0,01
15–20 см	Гауссова	3,00	1,00	4,00	75,00	13,02	0,04	0,17
20–25 см	Гауссова	3,54	1,16	4,70	75,32	14,24	-0,02	0,40
25–30 см	Гауссова	3,68	0,99	4,67	78,80	8,15	0,03	0,21
30–35 см	Сфериче- ская	3,96	1,22	5,18	76,45	8,43	0,00	0,44
35–40 см	Сфериче- ская	4,55	1,34	5,89	77,25	9,70	0,02	0,28
40–45 см	Сфериче- ская	5,00	1,60	6,60	75,76	10,20	0,12	0,02
45–50 см	Сфериче- ская	5,41	1,70	7,11	76,09	12,80	0,14	0,00

Примечание: SDL – уровень пространственной зависимости (spatial dependence level) ($100 \cdot C_0 / (C_0 + C_1)$)

Радиус влияния указывает на расстояние, после которого вариограмма выходит на плато. Это расстояние, в пределах которого наблюдается взаимосвязь между точками пространства по изучаемому признаку. Этот признак связан с размером агрегаций, которые могут быть обнаружены при изучении карт пространственной изменчивости твердости почв на различных глубинах (рис. 1).

При визуальной оценке данных послойного распределения твердости можно отметить, что участки с повышенной твердостью имеют наибольшие размеры в слоях от 15 до 30 см от поверхности. Радиус влияния на этом уровне наибольший, его значения достигают 14,31 м (табл. 2). Выше и ниже этого слоя радиус влияния статистически достоверной взаимосвязи между точками пространства по изучаемому признаку существенно меньше, его значение

колеблется в пределах 8,15–9,90 м. На картах, отражающих распределение твердости в этих слоях, видно уменьшение диаметра участков высокой твердости по сравнению с размером этих образований в слоях от 15 до 30 см. На уровне 40–50 см вглубь от поверхности опять увеличиваются диаметры структурных конструкций, твердость их возрастает. Здесь радиус влияния составляет 10.20–12.80 м (табл. 2).

Общий индекс I-Морана (*Spatial Autocorrelation, Global Moran's I*) – пространственная автокорреляция – основан одновременно на расположении объектов и их значениях. Индекс оценивает, имеется ли кластеризация объектов, или они распределены разбросанно, или случайно. Значимость индекса (p-уровень) – это числовое выражение области, расположенной под кривой, для известного распределения, ограниченного статистическим тестом. Оно показывает, насколько очевидное сходство (пространственная кластеризация) или несходство (пространственные выбросы) являются чем-то большим, нежели случайное распределение. Нулевая гипотеза утверждает, что значения объектов случайно распределены по области изучения. Когда p-значение указывает на статистическую значимость, положительный индекс I-Морана свидетельствует о тенденции к кластеризации. Отрицательные значения индекса I-Морана говорят о тенденции к дисперсному распределению объектов или явлений.

Согласно статистике I-Морана, мы можем говорить о существовании тенденции к кластеризации обговариваемых структурных образований во всех изученных слоях педозема кроме слоя 20–25 см (значение индекса I-Морана – – 0.02). Однако, уровень статистической значимости позволяет отвергнуть нулевую гипотезу при рассмотрении данных, полученных при изучении твердости в слоях 5–15 и 40–50 см от поверхности.

На уровне 0–5 и 15–40 см данный прием статистики не выявил пространственной зависимости формирования обнаруженных почвенных конфигураций. Вполне вероятно, полученные значения распределены случайно по изученной территории, однако возможно, что причиной не нахождения нами пространственной кластеризации был слишком большой шаг точек отбора проб, который не позволил уловить закономерность изменения изучаемого признака в этих слоях.

На уровне 0–5 и 15–40 см данный прием статистики не выявил пространственной зависимости формирования обнаруженных почвенных конфигураций. Вполне вероятно, полученные значения распределены случайно по изученной территории, однако возможно, что причиной не нахождения нами пространственной кластеризации был слишком большой шаг точек отбора проб, который не позволил уловить закономерность изменения изучаемого признака в этих слоях.

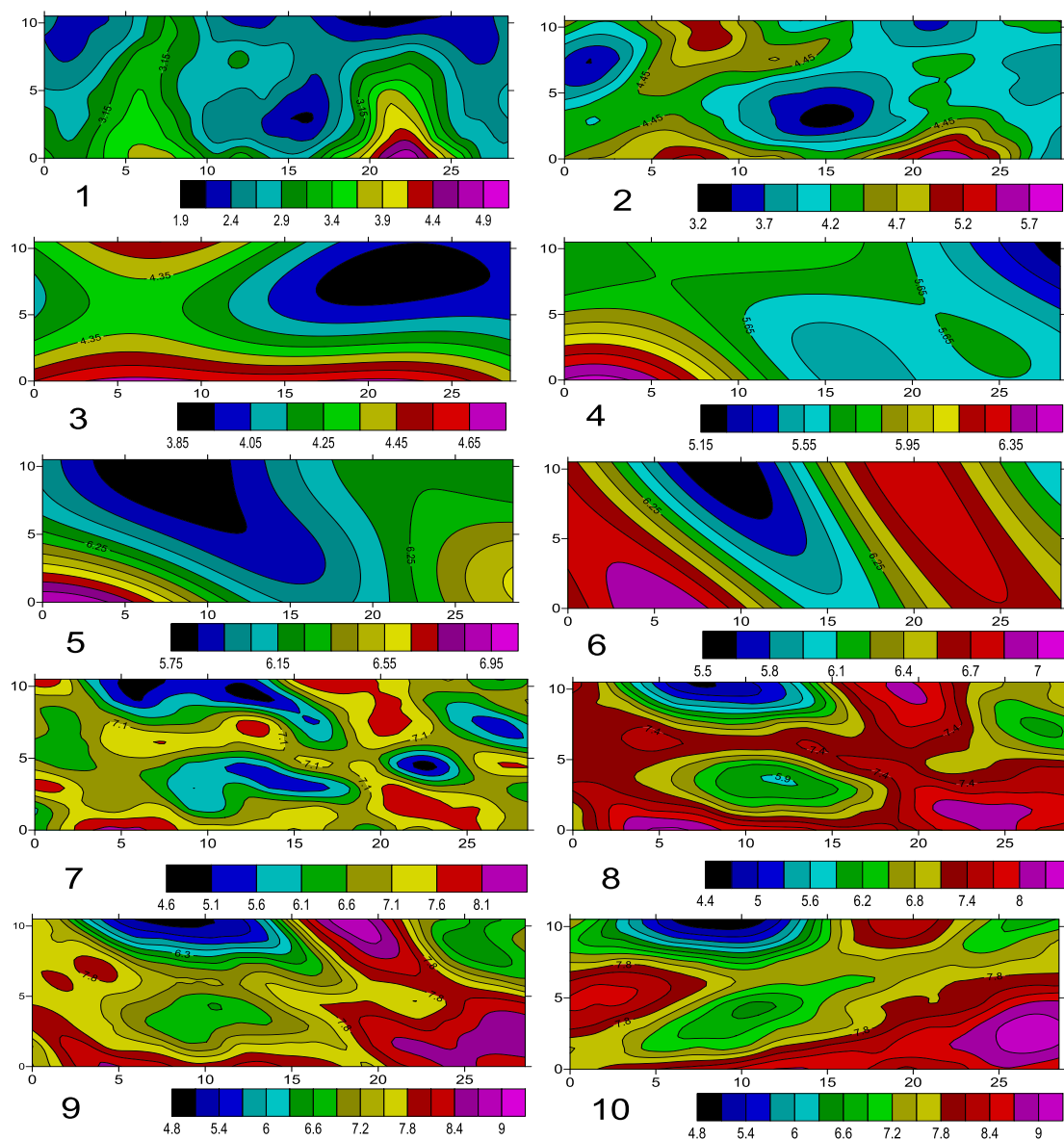


Рис. 1. Послойное распределение значений твердости педозема исследованного участка.

Условные обозначения: 1 – слой почвы находящиеся на 0-5 см, 2 – 5-10 см, 3 – 10-15 см, 4 – 15-20 см, 5 – 20-25 см, 6 – 25-30 см, 7 – 30-35, 8 – 35-40 см, 9 – 40-45 см, 10 – 45-50 см от поверхности.

За точку начала каждого вектора значений мы брали точку на поверхности почвы. Выделенные нами пласты почвы являются абсолютно параллельными ее поверхности. Причиной отсутствия отклонения распределения от

случайного в слоях 0–5 и 15–40 см может быть и то, что реальная плоскость формирования закономерной горизонтальной неоднородности не повторяет точно рельефа поверхности, поэтому, вполне вероятно, двухмерное картографирование и не может отобразить реальной картины формирования горизонтальной неоднородности достаточно глубоких слоев почвы.

В таком случае более адекватным является построение объемной карты изученного участка почвенной толщи в результате применения методов 3-мерной геостатистики.

Отображение трехмерного объекта в двумерное пространство (лист бумаги либо монитор компьютера) может быть сделано с помощью одновременного представления проекций объекта в трех плоскостях. Программа S-GeMS предоставляет возможность изменять положение плоскости среза, что даёт возможность понять трехмерную структуру объекта. На рисунке 2 показаны различные положения поперечной плоскости трехмерного отображения твердости педозема, базальная и боковая плоскости.

Визуальный анализ карты подтверждает результаты описательной статистики и позволяет говорить о наличии закономерного градиента увеличения твердости почвы от верхних слоев к нижним. Подобная закономерность наблюдается при анализе пространственной изменчивости твердости дерново-литогенных почв на лессах и лессовидных суглинках, серо-зеленых и красно-бурых глинах. Результаты упомянутых исследований были опубликованы нами ранее (Жуков, Кунах, 2011, Задорожная, 2012). Уплотнение почвы с нарастанием глубины является естественным следствием влияния массы вышележащих почвенных слоев на нижележащие, однако в разных участках этот процесс происходит с разной интенсивностью. Причинами формирования участков с повышенной твердостью, находящихся в почвенном материале меньшей твердости должно быть являющиеся комплексные явления, сочетающие в себе различные факторы структурообразования.

На определенной глубине возникают участки с повышенной твердостью, представляющие собой удлинённые зигзагообразные ребра жесткости. На других субстратах мы наблюдали цепи из твердых образований арочной формы (Задорожная, 2012), глыбы с основаниями, расширяющимися по направлению вниз, и образования «шарообразной» формы (Жуков, Кунах, 2011). В некоторых случаях пространственное моделирование отображает эти структурные конструкции как протяженные уплотнения, соединенные в цепи (Задорожная, 2012). Вполне вероятно, что они выполняют армирующую роль в механической организации почвенного покрова и рассматриваются как факторы оползневой и эрозионной стабильности. Речь идет о геоморфологической устойчивости почвенного покрова. Компоненты почвы с различной твердостью обладают различными физико-механическими свойствами. Они по-разному изменяются



при набухании, усадке либо расширении. Структурные конструкции, образованные на разных субстратах, различаются по форме и, наверняка, обладают разной динамичностью, как отличаются разные почвы по способности противостоять эрозии и оползням.

На выраженных геоморфологических склонах может увеличиваться скорость горизонтального смещения почвенного покрова и также наблюдаться волнообразное искривление поверхности почвы. Участки с повышенной твердостью почвы могут рассматриваться как эдафогенные аридускулы, а участки с меньшей твердостью – как эдафогенные потускулы (Бельгард, 1971). По Г. Н. Высоцкому (1962) потускулами являются такие участки почвенного покрова, которые усиленно промачиваются водой в сравнении с окружающей почвенной массой. В противоположность потускулам встречаются местообитания, которые не только не получают дополнительного питания, но, наоборот, часть выпадающих осадков стекает или сносится в соседние местообитания (Бельгард, 1971). При формировании структуры почвенного покрова как комбинации участков с повышенной и пониженной твердостью создаются предпосылки для аридускулярной–потускулярной мозаичности эдафогенного генезиса.

Профиль изученного педозема состоит из двух горизонтов – верхнего насыпного гумусированного слоя почвы и нижнего, который состоит из отвальной смеси горных пород. Глубина проникновения пенетromетра в нашем эксперименте равнялась 50 см, то есть проводилось исследование структурной организации насыпного слоя чернозема.

Среди структурообразующих факторов в черноземе прежде всего выделяют изменения объема и давления при переменном высушивании и увлажнении, замерзании и оттаивании воды в ней, химические реакции, в результате которых происходит образование труднорастворимых соединений (углекислый кальций, гидроокись железа и др.) а также биологические факторы: давления корней растений, деятельности роющих животных.

Им принадлежит одна из ведущих ролей в образовании и возобновлении структуры и ее неоднородности.

Пространственная неоднородность почвы – это такой признак, который усиливается постепенно с развитием почвообразования и в определенной мере есть следствием почвообразования (Розанов, 2004). При определении природы формирования вариабельности свойств педозема необходимо также учитывать влияние подстилающей породы на почвообразовательный процесс верхних горизонтов.

Это влияние может быть обусловлено водным, воздушным, тепловым режимам, которые, вероятно, осуществляются сопряжено в горизонтах почвы, находящихся в непосредственной близости.

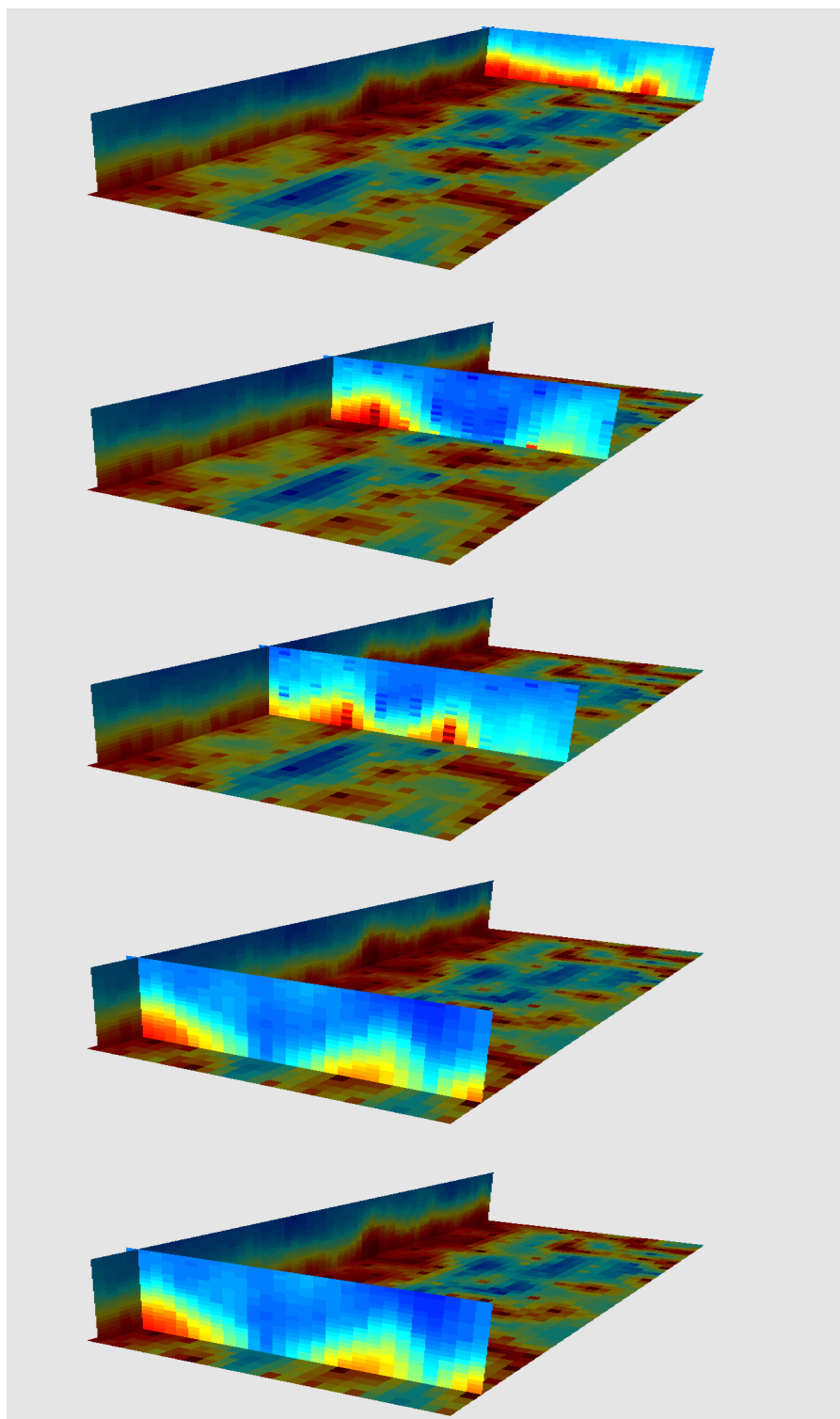


Рис. 2. 3-х мерная карта твердости педозема. Показаны различные положения поперечной плоскости.



Также, влияние подстилающей породы может быть обусловлено миграцией химических элементов при движении почвенного раствора. Многие химические элементы имеют непосредственное влияние на структурообразование в почве. Так кальций, которым богаты техноземы, способствует образованию почвенной структуры. Насыщенность поглощающего комплекса натрием делает почву дисперсной и наиболее доступной разрушающему действию воды и ветра. Миграция химических элементов может иметь опять же биогенную природу – это и перенесение химических элементов почвенными беспозвоночными, и педотурбационная активность позвоночных, а также вынос на поверхность элементов питания корнями растений и обогащение ими верхнего горизонта в результате сезонного отмирания однолетников и надземной части многолетников. В технической отвальной смеси горных пород изученного участка присутствуют и лессы, и красно-бурые, и серо-зеленые глины в равной степени, так как разработки марганцевых руд на горно-обогатительном комбинате в г. Орджоникидзе ведутся на 50 м вглубь. Пятнистость насыпки подстилающей породы, теоретически, тоже может быть причиной изменения твердости почвы в пространстве, а возможно и формы образующихся структурных отдельностей.

Все вышеперечисленные факторы влияют на формирование твердостных свойств педозема. Иными словами, твердость является интегративным свойством почвы. Исследование пространственной вариабельности твердости дает возможность анализировать организацию сложной системы почвы на более высоких уровнях иерархии. Последние представляют собой системы, включающие множество взаимодействующих частей, способные генерировать новое качество макроскопического коллективного поведения путем самоорганизации (в нашем случае путем спонтанного образования пространственных структур).

Выводы

1. На момент проведения исследований среднее значение твердости почвы закономерно увеличивалось с глубиной залегания слоя от $2,25 \pm 0,56$ в верхнем горизонте до $7,24 \pm 2,66$ на глубине 50 см от поверхности почвы. Порог твердости в 3 МПа достигался на глубине 15 см локально и на глубине 20–25 см уже на большинстве изученной территории. Резкое увеличение вариабельности признака наблюдалось в слоях почвы 25–40 см.
2. Для распределения показателей твердости на изученном участке почвы характерно отклонение от нормального закона в верхних слоях почвы (0–5 и 5–10 см от поверхности), что говорит о появлении на этом уровне качественной неоднородности изучаемого признака. Также статистическое распределение полученных данных отражает существование значительной территории на

глубине 30–50 см с относительно невысокой твердостью, в пределах которой вкраплены локалитеты с твердостью повышенной.

3. Результаты послойного исследования твердости педозема могут быть описаны статистическими законами распределения (в нашем случае этот сферическая и гауссова модели), что свидетельствует об объективности существования найденных структурных конструкций.

4. Твердость является интегративным свойством почвы, исследование ее пространственной вариабельности твердости дает возможность анализировать организацию сложной системы почвы на более высоких уровнях иерархии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

Геостатика и география почв / [отв. ред. П.В. Красильников]; Ин-т биологии КарНЦ РАН. – М.: Наука, 2007. – 175 с.

Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении / Науч. ред. Ю.Н. Благовещенский. Изд. 4-е, доп. – М. Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 336 с.

Рекультивация нарушенных земель как устойчивое развитие сложных техноэкосистем: Монография / И. Х. Узбек, А. С. Кобец, П. В. Волох и др.; под редакцией И. Х. Узбека. – Днепропетровск: «Пороги», 2010. – 263 с.

Медведев В. В. Твердость почв / В. В. Медведев. Харьков. Изд. КГ1 «Городская типография», 2009, 152 с.

Медведев В. В. Неоднородность как закономерное проявление горизонтальной структуры почвенного покрова / В. В. Медведев // Грунтознавство, 2010. Т. 11, № 1–2. – С. 6–15.

Faechner T. Prediction of Yield Response to Soil Remediation / T. Faechner, M. J. Pyrcz, C. V. Deutsch // Geoderma. – 2000. – Vol. 97. P. 21–38.

Жуков О.В. Твердость дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках / О.В. Жуков, О. М. Кунах // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2011, № 1. – С. 63–69.

Задорожная Г.А. Пространственная изменчивость дерново-литогенных почв на красно-бурых глинах / Г.А. Задорожная // Рекультивация складних техноекосистем у новому тисячолітті: ноосферний аспект: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ: ДДАУ, 2012. – С. 151–169.

Задорожна Г.О. Просторова організація дерново-літогенних ґрунтів на сіро-зелених глинах / Г.О. Задорожна // Біологічний вісник МДПУ, 2012, № 1. – С. 48–57.

Бельгард А. Л. Степное лесоведение / А. Л. Бельгард. – М.: Лесная промышленность, 1971. – 336 С.

Высоцкий Г. Н. Избранные сочинения / Г. Н. Высоцкий. – М.: Изд-во АН СССР. – 1962. – 730 с.



Розанов Б.Г. Морфология почв: Учебник для высшей школы / Б.Г. Розанов – М.: Академический Проект, 2004. – 432 с.

REFERENCES

- Krasilnikov, P.V. (Ed.) (2007). Geostatic and Geography of Soils. (2007). Moscow: Nauka.
- Dmitriev, Ye.A., (2010). Mathematical Statistics in Soil Sciences. Moscow: Librokom Publishing House.
- Uzbek, I.H., Kobets, A.S., Voloh, P.V. (2010). Waste Soils Reclamation As Sustainable Development of Complex Technological Ecosystems. Dnepropetrovsk: Porogi.
- Medvedev, V.V. (2009). Soil Hardness. Kharkov: Municipal Press.
- Medvedev, V.V. (2010). Heterogeneity as typical feature of soil horizontal structure. Soil Sciences. 11(1–2), 6–15.
- Faechner, T., Pyrcz, J., Deutsch, C.V. (2000). Prediction of Yield Response to Soil Remediation. Geoderma. 97, 21–38.
- Zhukov, O.V., Kunah, O.M. (2011). Hardness of soddy-lithogenic soils on the loess loams. Bulletin of Dnepropetrovsk State Agrarian University. 1, 63–69.
- Zadorozhnaia, G.A. (2012). Spatial variability of soddy-lithogenous soils on the red-brown clays. Proceed. Int. Sc. Conf. Dnepropetrovsk: State Agrarian University.

Zadorozhnaia, G.O. (2012). The spatial organization of soddy-lithogenic soils on the grey-green clays. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University*. 1, 48-57.

Belgard, A.L. (1971). *Steppe Forestry*. Moscow: Forest Industry.

Vysotskiy, G.N. (1962). *Selected Papers*. Moscow: USSR Academy of Science Press.

Rozanov, B.G. (2004). *Soil Morphology. University Textbook*. Moscow: Academic Project.

Поступила в редакцию 12.01.2013

Как цитировать:

Жуков, А.В., Задорожная, Г.А. (2013). Пространственная изменчивость твердости педоземов. *Биологический вестник Мелитопольского государственного педагогического университета имени Богдана Хмельницкого*, 1 (7), 34-49. **crossref**
[http://dx.doi.org/10.7905/bbmstu.v0i1\(7\).557](http://dx.doi.org/10.7905/bbmstu.v0i1(7).557)

© Жуков, Задорожная, 2013

Users are permitted to copy, use, distribute, transmit, and display the work publicly and to make and distribute derivative works, in any digital medium for any responsible purpose, subject to proper attribution of authorship.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 3.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/).