

## БИОГЕОЦЕНОЛОГИЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УДК 631.618:633.2.031  
© 2011

**А.В. ЖУКОВ,  
О.Н. КУНАХ,**

*кандидаты биологических наук*

### ТВЕРДОСТЬ ДЕРНОВО-ЛИТОГЕННЫХ ПОЧВ НА ЛЕССОВИДНЫХ СУГЛИНКАХ

*Днепропетровский государственный  
аграрный университет—  
Днепропетровский национальный  
университет им. О. Гончара*

*Вивчено просторову мінливість твердості дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках. Аналіз тривимірної карти свідчить про наявність закономірного градієнта збільшення твердості ґрунту від верхніх горизонтів до нижніх. Спостерігається горизонтальна неоднорідність ґрунтового покриття, що проявляється у вигляді ділянок з підвищеною твердістю, які мають конфігурацію брил з розміром у горизонтальному напрямку 2,5–4 м. Установлено, що потускулярно-аридускулярна мозаїчна структура покриття дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках має геоморфогенно-едафогенну природу.*

Чтобы доказать факт существования порядка и описать порождающие его правила, необходима регулярная схема опробования [4], которая подразумевает размещение точек опробования с постоянным шагом на прямой линии, пересекающей территорию [3].

Уплотнение почвы может возникать в результате антропогенного воздействия (движение технологического транспорта по поверхности почвы) или естественных причин, например в солонцовых почвах [10]. Уплотнение влияет на физическую структуру, плотность сложения, твердость и аэрацию почвы. Все эти свойства влияют на рост растений [12]. Такие характеристики корневых систем растений, как диаметр, длина и морфология подвержены влиянию уплотнения почвы [5]. Очень важной является задача определения масштабов уплотнения почвы в пределах поля. Полезным инструментом для её решения является пенетрометр, с помощью которого можно быстро измерить твердость почвы на сравнительно большой территории. Считается, что твердость почвы, измеренная с помощью пенетрометра, отражает то противодействие, которое испытывает корень растения во время роста [7]. Максимальное давление корней на почву находится в диапазоне 0,9–1,3 МПа [11]. По данным других исследователей, рост корней прекращался при

сопротивлению 0,8–5 МПа [6]. Таким образом, показания пенетрометра, превышающие 5 МПа, свидетельствуют об уплотненной почве, которая противодействует росту корней, что влияет на первичную продуктивность растительности [10].

Почва является трехмерным телом, свойства которого могут изменяться в пределах пространственных и временных масштабов в любом направлении [9]. Тем не менее почвы обычно исследуются только в горизонтальном направлении, и если целью исследования является 3-D характеристика пространственной изменчивости, то она описывается как совокупность горизонтальных слоев для различных глубин. Главным недостатком плоского 2-D представления состоит в том, что может появляться несоответствие между этими слоями, когда они размещаются один над другим [9].

**Целью** настоящей работы является изучить трехмерную организацию дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках по данным о пространственной изменчивости твердости.

**Методы исследований.** Работы проведены на научно-исследовательском стационаре Днепропетровского государственного аграрного университета в г. Орджоникидзе. Экспериментальный участок по изучению опти-

## БИОГЕОЦЕНОЛОГІЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Твердость дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках

мальных режимов рекультивации был создан в 1968–1970 гг. Отбор проб произведен на варианте техноземов, сформированных и лессовидных суглинках (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. С таким же интервалом находятся и точки отбора проб. 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 проводили в полевых условиях с помощью ручного пенетрометра Eijkelkamp на глубину до 50 см с интервалом 5 см. Средняя погрешность результатов измерений прибора составляет ±8 %. Для измерения использовали конус с размером поперечного сечения 1 см<sup>2</sup>. В пределах каждой ячейки твердость почвы измеряли в однократной повторности. Измерения проведены 22 июня 2010 г.

Статистические расчеты выполнены с помощью программы Statistica 7.0, двухмерное картографирование и оценка геоestatистических показателей – с помощью программы Surfer 8.0, оценка I-статистики Морана – с

использованием программы GeoDa 0.9.5-i (<http://geodacenter.asu.edu/>).

В 3-D геостатистическом анализе использована программа S-GeMS (<http://sgems.sourceforge.net/>).

3-D вариограмма была представлена двумя вложенными структурами. Первая анизотропная сферическая вариограмма с наибольшим диапазоном 3,8 м (направлен горизонтально), средним – 2,7 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 минимальными диапазонами описывает изменчивость твердости почвы в вертикальном направлении.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Среднее значение твердости закономерно увеличивается с глубиной. В верхнем 5-сантиметровом слое твердость находится на уровне 0,57 МПа и увеличивается до 6,01 МПа на глубине 30–35 см (табл. 1). На глубине 40–45 см наблюдается локальный минимум твердости со значением 5,68 МПа. На глубине 45–50 см твердость снова увеличивается. Значения твердости в каждом из почвенных горизонтов 0–5, 5–10, 10–15 и

### 1. Описательные статистики твердости дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках, МПа

Свойство	Среднее	Медиана	Ст. откл.	Асимметрия	Экцесс	CV	d
0–5 см	0,57	0,60	0,30	0,10	–1,12	51,65	0,19
5–10 см	1,49	1,40	0,53	0,76	0,34	35,81	0,16
10–15 см	3,23	2,85	1,51	0,89	0,26	46,70	0,12
15–20 см	4,80	4,55	1,66	0,42	–0,42	34,53	0,08*
20–25 см	5,70	5,75	1,71	0,21	–0,30	30,01	0,06*
25–30 см	5,98	5,85	1,85	0,42	–0,60	30,97	0,07*
30–35 см	6,01	5,75	1,96	0,43	–0,73	32,62	0,09*
35–40 см	5,83	5,55	2,02	0,36	–0,52	34,61	0,09*
40–45 см	5,68	5,50	1,99	0,61	–0,21	35,00	0,08*
45–50 см	5,94	5,40	1,99	0,53	–0,59	33,50	0,12

d – статистика Колмогорова-Смирнова; \* 5%-ный уровень значимости.

## БИОГЕОЦЕНОЛОГІЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Твердость дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках

15–20 см статистически достоверно (по *t*-критерию Стьюдента) отличаются от остальных горизонтов. Послойные различия в твердости в толще почвы 25–50 см статистически недостоверны, поэтому в пределах всего исследуемого участка горизонт 25–50 см следует признать как однородный по критерию твердости почвы.

Верхние почвенные горизонты отличаются большим уровнем вариабельности твердости. В почвенной тоще 20–50 см послойный коэффициент вариации находится в пределах 30,01–35,00 %.

Твердость почвы на глубине 0–5 см характеризуется наименьшим значением асимметрии и наибольшим значением эксцесса. Это свидетельствует о явно неоднородном характере распределения этого признака, что также подтверждается достоверным отличием по тесту Колмогорова-Смирнова от нормального закона распределения.

Твердость почвы на глубинах 5–10 и 10–15 см характеризуется наибольшими значениями асимметрии и позитивным эксцессом, что отличает характер статистического распределения в этих горизонтах от прочих. Эти распределения не являются нормальными, что подтверждается тестом Колмогорова-Смирнова. Такой характер распределения

твердости позволяет предположить наличие действующих факторов, которые приводят к уменьшению твердости. Необходимо отметить, что слой 5–15 см является корнеобитаемым, вероятно с этим связана тенденция к уменьшению твердости.

Для слоев в диапазоне 15–45 см распределения достоверно не отличаются от нормального. Для идеального нормального распределения асимметрия и эксцесс равны нулю, поэтому наблюдаемые значения этих статистик можно рассматривать как тенденции, отражающие специфику поведения твердости в каждом слое. Эксцесс во всех этих слоях отрицательный, что свидетельствует о тенденции к двугоршинности распределения. Самой высокой степени такая тенденция достигается на глубине 45–50 см, где наблюдается статистически достоверно отклоняющееся от нормального закона асимметричное (0,53) двугоршинное (–0,59) распределение. Такое распределение описывает существование значительной территории на глубине 45–50 см с относительно невысокой твердостью, в пределах которой вкраплены локалитеты с высокой твердостью. Очевидно, что описательные статистики не учитывают пространственную организацию изучаемого явления и могут быть основой для генерирования ги-

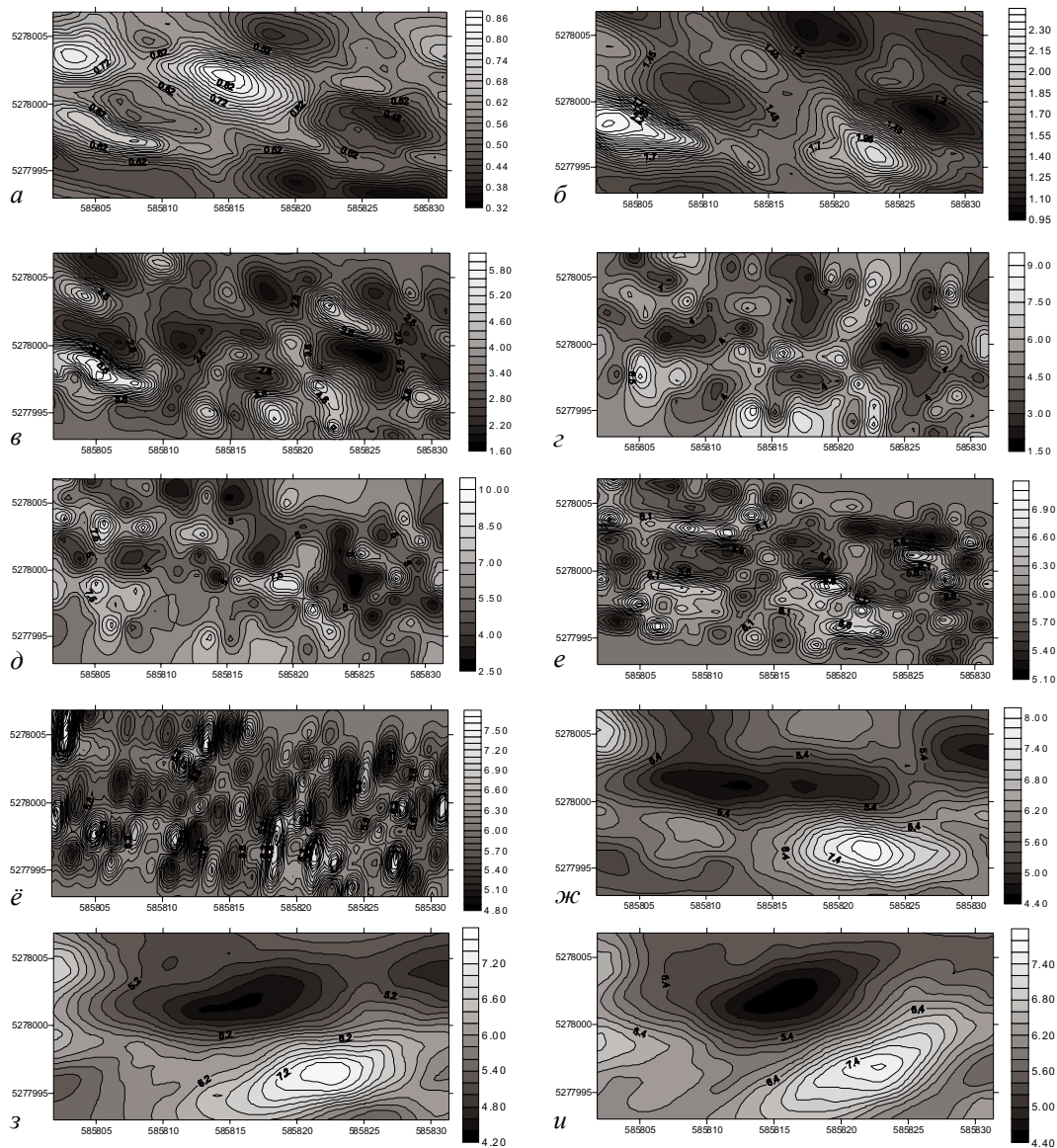
### 2. Геоэкономические параметры твердости дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках

Свойство	$C_0$ (нагетт)	$C_1$ (частичный порог)	$C_0 + C_1$ (порог)	SDL*, %	Радиус влия- ния, м	I-Морана	p-уровень
5	0,06	0,03	0,09	64,71	17,64	0,06	0,11
10	0,14	0,14	0,29	50,00	21,00	0,20	0,00
15	0,81	1,40	2,20	36,57	7,35	0,11	0,01
20	0,97	1,78	2,75	35,28	4,39	0,04	0,17
25	1,50	1,42	2,92	51,37	4,82	-0,02	0,40
30	2,49	0,91	3,40	73,16	4,84	0,03	0,21
35	2,50	1,33	3,83	65,27	5,38	0,00	0,44
40	2,71	1,42	4,13	65,62	22,50	0,02	0,28
45	2,84	1,62	4,46	63,68	37,20	0,12	0,02
50	2,99	1,38	4,37	68,42	36,60	0,14	0,00

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

# БИОГЕОЦЕНОЛОГИЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Твердость дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках



**Рис. 1.** Пространственная изменчивость твердости (МПа) дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках на глубине: а – 5 см; б – 10 см; в – 15 см; г – 20 см; д – 25 см; е – 30 см; ё – 35 см; ж – 40 см; з – 45 см; и – 50 см

потез о природе количественных изменений твердости почвы (табл. 2).

Наггет-эффект указывает на значимость непространственной компоненты изменчивости признака. Совместный учет частичного порога и наггет-эффекта позволяет оценить уровень пространственной зависи-

мости. 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; если пространственное отношение превышает 75 %, то переменная рассматривается как слабо пространственно зависимая [8]. Твердость почвы на различных горизонтах является умеренно пространственно зависимой, так как показатель SDL варьирует в пределах от 35,28 до 73,16 %.

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

Для глубин 0–5 и 5–10 см радиус влияния составляет 17,64 и 21,00 м. На карте наблюдаются области высокой либо низкой твердости протяженностью, соответствующей этим радиусам влияния. На глубинах от 15 до 35 см радиус влияния существенно уменьшается до значений 4,39–7,35 м. На картах твердости на соответствующих глубинах наблюдаются мозаичные структуры с размерами однородных участков 4–7 м.

На глубинах 40–50 см радиус влияния находится на уровне 22,5–36,6 м, что позволяет в большей степени говорить о пространственном тренде в изменчивости твердости в масштабах изучаемой территории, а не о мозаичной структуре.

Необходимо учесть, что на глубине 15–50 см статистически однородные распределения соответствуют совершенно различным пространственным структурам. На глубине 15–35 см наблюдается мозаичная структура, в которой сочетаются однородные участки с высокой и низкой твердостью. Далее на глубине до 50 см наблюдается плавная трендовая тенденция изменчивости твердости почвы.

Индекс Морана позволяет оценить степень пространственной зависимости переменной в зоне, заданной матрицей смежности. Соседи в матрице смежности для данной точки были выбраны по правилу “ферзя” – все наиболее близкие к ней точки.

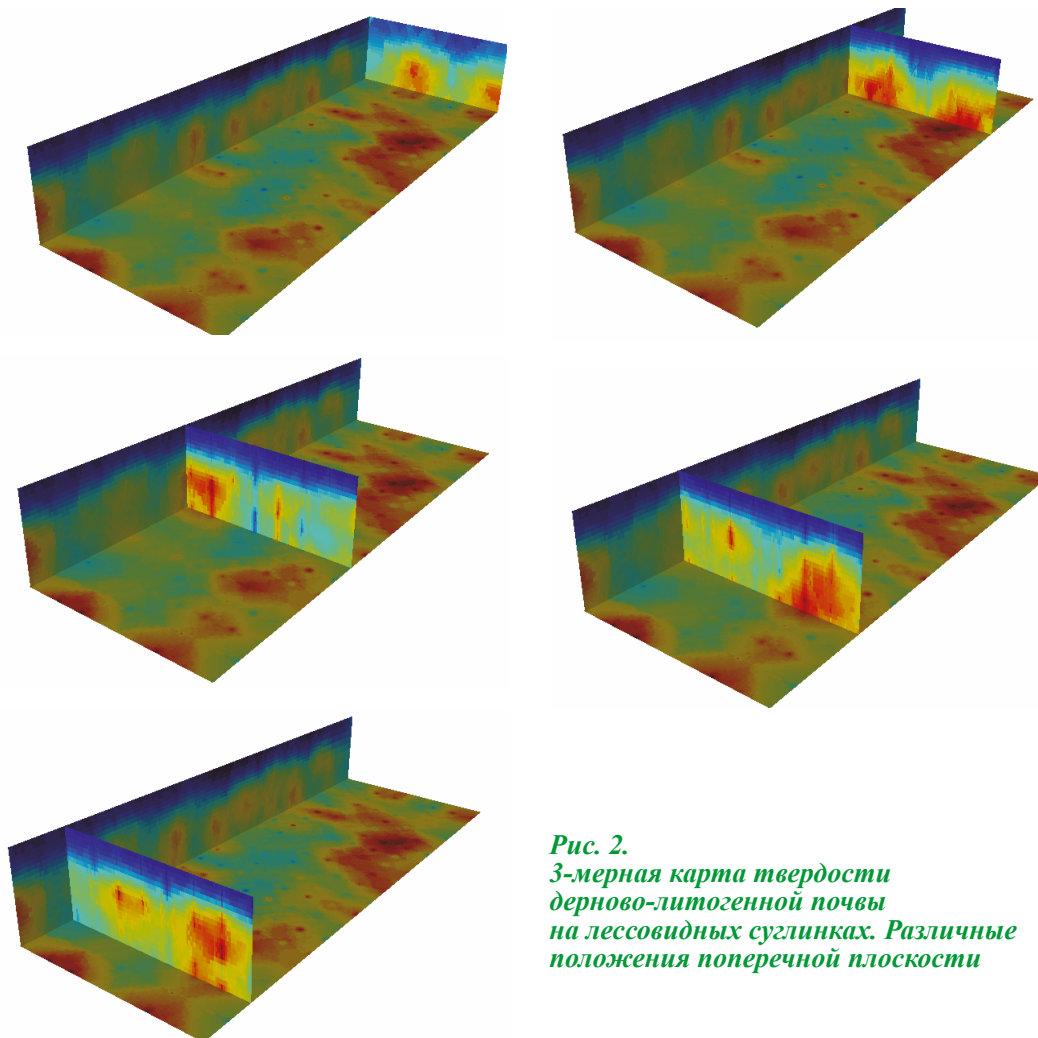
Коэффициент корреляции между радиусом влияния и индексом Морана составил

0,61, что свидетельствует о чувствительности индекса Морана к глобальным трендам в большей степени, чем к локальным взаимодействиям. Коэффициент корреляции индекса Морана с пространственным отношением составляет всего –0,14. Эта закономерность также подчеркивает более узкую чувствительность индекса Морана к пространственным зависимостям.

В результате применения методов 3-мерной геостатистики может быть построена объемная карта участка почвенной толщи мощностью 50 см (рис. 2). Отображение 3-мерного объекта в двумерное пространство (лист бумаги либо монитор компьютера) может быть сделано с помощью одновременного представления проекций объекта в трех плоскостях. На этом рисунке – базальная плоскость представляющая собой двумерную карту изменчивости твердости почвы на глубине 50 см, и различные положения одной из боковых плоскостей. Программа S-GeMS предоставляет возможность изменять положение плоскости среза, что даёт возможность понять 3-мерную структуру объекта.

Анализ карты свидетельствует о наличии закономерного градиента увеличения твердости почвы от верхних слоев почвы к нижним. Это является естественным результатом влияния массы вышележащих почвенных слоев на нижележащие, вследствие чего происходит уплотнение почвы с нарастанием глубины. Однако в разных участках этот процесс происходит с разной интенсивностью, формируются участки с повышенной твердостью, которые имеют конфигурацию глыб размером в горизонтальном направлении 2,5–4 м. Эти глыбы расположены в почвенном материале меньшей твердости. 3-мерный анализ позволяет установить, что многие глыбы имеют основания, расширяющиеся по направлению вниз. Некоторые из твердых тел характеризуются округлой формой с уменьшающимся вниз основанием. Очевидно, что воздействие вышележащих слоев почвы является не единственным фактором, который определяет твердость почвы.

Расположение почвенных образований с повышенной твердостью создает предпосылки для пестроты экологических условий существования растений.



*Рис. 2.  
3-мерная карта твердости  
дерново-литогенной почвы  
на лессовидных суглинках. Различные  
положения поперечной плоскости*

Регулярный характер расположения почвенных тел с увеличенной твердостью в среде с меньшей твердостью позволяет обратить внимание на другие эффекты, связанные с твердостью, помимо широко известных (аэрация, водный обмен, противодействие росту растений). Речь идет о геоморфологической устойчивости почвенного покрова. Почвенные тела с широким основанием могут рассматриваться как факторы оползневой и эрозионной стабильности. Такие формы выполняют армирующую роль в механической организации почвенного покрова. Образования с уменьшающимся основанием (“шаро-

образной” формы) в менее твердом субстрате могут приводить к нарушению стабильности почвенного покрова. Вероятность изменения геометрии почвенной поверхности и перемещения почвенной массы очень увеличивается при наличии неустойчивых почвенных тел в менее твердой почвенной массе. Компоненты почвы с различной твердостью обладают различными физико-механическими свойствами. Они по-разному изменяются при набухании, усадке либо расширении. Поэтому динамичность твердого образования, которое не имеет устойчивого основания в менее твердой почвенной массе, может приводить к

подвижности почвенного покрова в целом. В горизонтальных позициях эта динамичность проявляет себя в изменении формы поверхности почвы, она становится волнистой. На выраженных геоморфологических склонах может увеличиваться скорость горизонтального смещения почвенного покрова и наблюдаться волнообразное искривление поверхности почвы.

Участки с повышенной твердостью почвы могут рассматриваться как эдафогенные аридускулы, а участки с меньшей твердостью – как эдафогенные потускулы [1]. По Г.Н. Высоцкому [2], потускулами являются такие участки почвенного покрова, которые

усиленно промачиваются водой в сравнении с окружающими участками. В противоположность потускулам встречаются местообитания, которые не только не получают дополнительного питания, но, наоборот, часть выпадающих осадков стекает или сносится в соседние местообитания.

По своему генезису потускулы и аридускулы могут быть геоморфогенными, эдафогенными, фитогенными и комбинированными [1]. При формировании структуры почвенного покрова как комбинации участков с повышенной и пониженной твердостью создаются предпосылки для аридускулярно-потускулярной мозаичности эдафогенного генезиса.

### **Выводы**

*Изменения формы почвенного микрорельефа вследствие закономерных различий твердости приводят к усилению контрастности перераспределения влаги между микростациями, что создает условия для геоморфогенного образования потускулов и аридускулов. Таким образом, потускулярно-аридускулярная мозаичная структура покрова дерново-пелитовых почв на лессовидных суглинках имеет геоморфогенно-эдафогенную природу.*

### **Библиография**

1. Бельгард А.Л. Степное лесоведение / А.Л. Бельгард. – М. : Лесная промышленность, 1971. – 336 с.
2. Высоцкий Г.Н. Избранные сочинения / Г.Н. Высоцкий. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 730 с.
3. Козловский Ф.И. Почвенный индивидуум и методы его определения / Ф.И. Козловский // Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. – М. : Наука, 1970. – С. 42–59.
4. Методологические основания отображения элементарных геосистемных процессов / [Ю.Г. Пузаченко, М.В. Федяева, Д.Н. Козлов, М.Ю. Пузаченко] // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах геосистем. – М. : Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. – С. 13–52.
5. Atwell B.J. The effect of compaction on wheat during early tillering: I. growth, development and root structure / B.J. Atwell // *New Phytology*. – 1990. – Vol. 115. P. 29–35.
6. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat / [G.R. Bathke, D.K. Cassel, W.L. Hargrove, P.M. Porter] // *Soil Science*. – 1992. – Vol. 154. – P. 316–328.
7. Bengough A.G. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses / A.G. Bengough, C.E. Mullins // *Journal Soil Science*. – 1990. – Vol. 41. – P. 341–358.
8. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils / C.A. Cambardella, T.B. Moorman, J.M. Novak [et al.] // *Soil Science Soc. Am.* – 1994. – Vol. 58. – P. 1501–1511.
9. 3D spatial variation of the soil impedance as affected by soil tillage / [A. Castrignano, D. De Giorgio, F. Fornaro, A.V. Vonella] // *Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solutions-13th International Soil Conservation Organisation Conference – Brisbane*. – 2004 – Paper No. 744. – P. 1–5.
10. Faechner T. Prediction of Yield Response to Soil Remediation / T. Faechner, M.J. Pyrcz, C.V. Deutsch // *Geoderma*. – 2000. – Vol. 97. P. 21–38.
11. Misra R.K. Penetration of soil aggregates of finite size: plant roots / R.K. Misra, A.R. Dexter, A.M. Alston // *Plant Soil*. – 1986. – Vol. 95. – P. 59–85.
12. Panayiotopoulos K.P. Compaction and penetration resistance of an alfisol and entisol and their influence on root growth of maize seedlings / K.P. Panayiotopoulos, C.P. Papadopoulou, A. Hatjioannidou // *Soil Tillage Research* – 1994. – Vol. 31. – P. 323–337.