

Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія. – 2011. – Вип. 19, т. 1. – С. 65–74.
Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology. Ecology. – 2011. – Vol. 19, N 1. – P. 65–74.

УДК 574.4:504.054

О. Н. Кунах, А. А. Балдин

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ТВЕРДОСТИ ПОЧВЫ В ПРИСТЕННОЙ ДУБРАВЕ

Приведенные данные свидетельствуют о том, что твердость почвы в пристенной дубраве является важным фактором, влияющим на ряд существенных экологических свойств этого биогеоценоза. Лимитирующее значение для проективного покрытия травянистой растительности имеет глубина, с которой начинается твердость почвы 5 МПа. При приближении этого уровня к поверхности почвы проективное покрытие травянистой растительности сокращается. Проективное покрытие оказывает влияние на трофическую активность почвенных животных и электрическую проводимость почвы. Развитие растительного покрова оказывает ограничивающее влияние на мощность мертвого растительного покрова. Уменьшение проективного покрытия способствует росту мощности подстилки. Подстилка также оказывает влияние на трофическую активность почвенных животных и на электропроводность почвы.

О. М. Кунах, А. О. Балдин

Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара

ЕКОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ ТВЕРДОСТІ ҐРУНТУ У ПРИСТІНІЙ ДІБРОВІ

Наведені дані свідчать про те, що твердість ґрунту у пристінній діброві – важливий чинник, що впливає на ряд істотних екологічних властивостей цього біогеоценозу. Лімітуючі значення для проективного покриття трав'янистої рослинності має глибина, з якої починається твердість ґрунту 5 МПа. При наблизненні цього рівня до поверхні ґрунту проективне покриття трав'яної рослинності зменшується. Проективне покриття впливає на трофічну активність ґрунтових тварин і електричну провідність ґрунту. Розвиток рослинного покриву впливає на потужність мертвого рослинного покриву. Зменшення проективного покриття сприяє росту потужності підстилки. Підстилка також впливає на трофічну активність ґрунтових тварин і на електропровідність ґрунту.

O. N. Kunakh, A. A. Baldin

Oles' Honchar Dnipropetrovsk National University

ECOLOGICAL ASPECT OF THE SOIL MECHANICAL RESISTANCE IN THE OAK FOREST OF THE STEEP BANK

The obtained data revealed that soil mechanical resistance is an important factor affected many essential ecological properties of the biogeocoenosis. The soil layer's mechanical resistance of 5MP is a limitation factor for the projective cover of herbaceous vegetation. If the 5MP mechanical resistance spreads to upper soil layer up, then the the grass cover decreases. The development of the plants projective cover affects the soil animals' trophic activity and soil electrical conductivity. The expansion of the plant cover impacts on the capacity of dead plant horizon. The decrease of the projective plant cover favours the increase of the litter mass. The litter also influences the soil animals' trophic activity and soil electrical conductivity.

Введение

Чтобы доказать факт существования порядка и описать порождающие его правила, необходима регулярная схема опробования [5]. Последняя подразумевает размещение пробных точек 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, как, 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 [6].

Очень важной является задача определения масштабов уплотнения почвы в пределах поля. Полезным инструментом для ее 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 [9]. Максимальное давление корней на почву находится в диапазоне 0,9–1,3 МПа [11]. По данным других исследователей, рост корней прекращался при сопротивлении 0,8–5,0 МПа [7]. Таким образом, показания пенетрометра, которые превышают 5 МПа, свидетельствуют об уплотненной почве, которая противодействует росту корней, что влияет на первичную продуктивность растительности [10].

Показатели твердости почв широко применяются при исследовании агроземов. Цель нашей работы – оценить закономерности пространственной изменчивости твердости почвы в участке естественной дубравы и влияние этой характеристики почвы на некоторые экологические свойства биогеоценоза (проективное покрытие травянистой растительности, мощность подстилки, электрическую проводимость почвы и трофическую активность почвенных животных).

Материал и методы исследований

Экспериментальный полигон заложен в июне 2010 г. в средней части склона правого берега р. Самара (48°45'55,95" СШ, 35°25'57,16" ВД) в пристенной дубраве. В нескольких метрах южнее полигона начитается крутой склон, который непосредственно упирается в берег реки. Восточнее от полигона в 7–15 м расположен овраг, который разрезает склон в направлении, перпендикулярном направлению русла реки. Уклон рельефа в пределах полигона составляет 10–15 %.

Полигон представляет собой совокупность из 100 соприкасающихся ячеек размером 2 × 2 м. Ячейки составляют 5 трансект по 20 ячеек в каждой. Таким образом, полигон имеет форму прямоугольника со сторонами 10 × 40 м, большая сторона полигона ориентирована на север, перпендикулярно руслу р. Самара. По углам ячеек произведены измерения почвенных свойств и трофической активности почвенных животных. Оценка экологических характеристик растительности и подстилки произведена в пределах ячеек полигона.

В древостое преобладают клен полевой (*Acer campestre* L.), клен остролистный (*A. platanoides* L.), вяз граболистный (*Ulmus minor* Mill.), дуб обыкновенный (*Quercus robur* L.), клен татарский (*A. tataricum* L.). Кустарники представлены бересклетом бородавчатым (*Euonymus verrucosa* Scop.) и боярышником обманчивым (*Crataegus fallacina* Klokov). В травостое преобладают фиалка удивительная (*Viola mirabilis* L.) и звездчатка средняя (*Stellaria media* (L.)). Анализ растительного покрова показывает, что полигон занимает границу перехода между двумя типами леса: свежая бересто-

ясеневая дубрава с мятликом (Dn_2) и свежаватый бересто-чернокленовый дубняк с ежей (E_{1-2}).

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 конусом с размером поперечного сечения 1 см^2 . В пределах каждой ячейки измерения твердости почвы производились в однократной повторности.

Электрическую проводимость почвы (apparent soil electrical conductivity – ECa) измеряли с помощью сенсора HI 76305 (Hanna Instruments, Woodsocket, R. I.). Измерения в пределах каждой ячейки производили в трехкратной повторности.

Трофическую активность почвенных животных определяли с помощью метода приманочных пластинок (bait-lamina test), предложенного Э. Тёрне [4; 13]. Приманочные пластинки из твердого пластика имеют общую длину 13 см (10 см погружается в почву и «ручка» 3 см остается выше поверхности почвы). На расстоянии 5 мм от центров в пределах 10 см участка на пластине сделаны отверстия с диаметром 2 мм. В отверстия помещается приманка из растительной клетчатки. Клетчатку предварительно просеивали через сито размером 0,25 мм, из полученного порошка и воды получали густую массу, которую вносили в отверстия на пластинке. После высушивания приманка, которая находилась в отверстиях пластинки, несколько уменьшалась в размере, образуя «микротаблетки». Металлическим стержнем в почве делалась ниша, в которую до уровня верхнего отверстия с приманкой помещалась пластинка. Перфорирование приманок оценивали через 10 суток. Результаты представлены как процент перфорированных отверстий.

В каждой ячейке полигона определяли общее проективное покрытие травостоя по визуальной шкале с градациями 0, 10, ..., 90, 100 % [2].

Измерение подстилки проводили по методу Е. Л. Воробейчика [1] в трехкратной повторности в каждой ячейке.

Построение карт поверхностей и геостатистические расчеты произведены с помощью программы Surfer 8.0, вычисление статистики Мантеля произведено в программе GeoDa (<http://geodacenter.asu.edu/>). Моделирование структурными уравнениями произведено с помощью программы Lisrel 8.0 (<http://www.ssicentral.com/>).

Результаты и их обсуждение

Твердость почвы увеличивается с ростом глубины почвенного горизонта (табл. 1). В горизонте 0–5 см этот показатель в среднем составляет 1,72 МПа, а на глубине 45–50 см – 5,11 МПа. Коэффициент вариации находится в пределах 26,7–30,7 %.

Для большинства горизонтов распределение значений твердости в пределах изученного полигона описывается нормальным законом. Достоверно отличие от нормального закона распределения только для значений твердости на глубине 5–10 см. Для большинства горизонтов характерна положительная асимметрия распределения (за исключением горизонтов 5–10 и 40–45 см), что свидетельствует о сдвиге распределения влево, то есть в сторону меньших значений. Распределение значений на всех горизонтах двугорбное (либо многовершинное на глубинах 5–10 см), что свидетельствует о контрастности режима твердости почвы в пределах изучаемого полигона. Показатель эксцесса указывает на степень выраженности одного из локальных максимумов твердости. Отрицательный эксцесс характерен для распределений с одним преобладающим максимумом и одним существенно ему уступающим, а положительный эксцесс характерен для двух соразмерных максимумов.

Таблица 1

Описательные статистики твердости почвы (МПа)

Горизонт, см	Среднее	Медиана	Ст. откл.	Асимметрия	Экцесс	CV	d
0–5	1,72	1,70	0,47	0,17	–0,72	27,33	0,09*
5–10	2,30	2,40	0,66	–0,04	–0,08	28,70	0,11
10–15	2,81	2,85	0,81	0,29	0,25	28,83	0,08*
15–20	3,45	3,45	1,06	0,57	0,41	30,72	0,08*
20–25	4,04	4,00	1,21	0,45	–0,25	29,95	0,08*
25–30	4,41	4,50	1,18	0,56	0,94	26,76	0,07*
30–35	4,55	4,50	1,24	0,13	0,50	27,25	0,08*
35–40	4,74	4,60	1,41	0,23	–0,40	29,75	0,06*
40–45	4,91	5,00	1,44	–0,04	–0,44	29,33	0,08*
45–50	5,11	4,95	1,51	0,29	0,07	29,55	0,08*

Примечание: d – статистика Колмогорова – Смирнова; * – 5 % уровень значимости.

Геостатистические параметры твердости почв представлены в таблице 2. Нагетт-эффект указывает на значимость непространственной компоненты изменчивости признака. Совместный учет частичного порога (пространственной компоненты изменчивости) и нагетт-эффекта позволяет оценить уровень пространственной зависимости (показатель SDL или пространственное отношение). Этот показатель изменяется от 0 до 100 %.

Таблица 2

Геостатистические параметры твердости почвы

Горизонт, см	C_0 (Нагетт)	C_1 (частичный порог)	C_0+C_1 (Порог)	SDL, %	Радиус влияния, м	I-Морана	p-уровень	R^2 тренда
0–5	0,16	0,17	0,34	48,83	27,02	0,18	0,002	0,25
5–10	0,20	0,21	0,41	49,02	1,69	0,14	0,006	0,18
10–15	0,26	0,35	0,61	42,82	2,35	0,20	0,001	0,22
15–20	0,49	0,52	1,01	48,08	1,85	0,14	0,006	0,18
20–25	0,36	1,05	1,41	25,75	2,47	0,14	0,005	0,11
25–30	0,43	0,79	1,22	35,37	2,61	0,19	0,002	0,16
30–35	0,44	1,00	1,44	30,44	1,55	0,09	0,033	0,16
35–40	0,76	1,20	1,96	38,78	1,90	–0,01	0,561	0,10
40–45	0,79	1,30	2,09	37,82	2,05	0,04	0,149	0,07
45–50	1,11	1,27	2,38	46,64	2,43	–0,01	0,460	0,04

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

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 [9]. Твердость почвы является сильно (горизонт 20–25 см, SDL = 25,75) и умеренно пространственно зависимой (прочие горизонты, SDL в пределах 30,44–48,83).

На пространственную зависимость переменной указывает также индекс Морана. Этот показатель является коэффициентом корреляции между значением признака в данной точке пространства и усредненным значением этого признака в соседнем окружении данной точки. Степень соседства может быть установлена различными способами, нами выбран «ферзеобразный» критерий, когда соседями считаются все ячей-

ки, имеющие любой контакт с данной. Уровень значимости установлен при помощи 999 пермутаций.

Для горизонтов от 0–5 до 30–35 см установлены значимо отличные от нуля индексы Морана. Для более глубоких горизонтов индексы Морана значимо не отличаются от нуля. Очевидно, что индекс Морана отражает наличие пространственного тренда в изменчивости признака. Был проведен регрессионный анализ зависимости значений твердости от пространственных координат. В качестве уравнения регрессии был выбран полином второй степени:

$$Z = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3Y + a_4Y^2 + a_5XY,$$

где X и Y – пространственные координаты, Z – значение признака в данной точке; a_0 – a_5 – регрессионные коэффициенты. Степень точности описательных возможностей уравнения тренда характеризуется статистикой R^2 . В точном соответствии с показателями теста Морана статистика R^2 свидетельствует о том, что для показателей твердости почвы на глубине от 0–5 до 30–35 см наблюдается отчетливый тренд изменчивости, который может быть описан полиномом второй степени. Для глубин 35–50 см значение такого тренда затухает и уступает значимость для локальных флуктуаций твердости почвы.

Пространственная изменчивость твердости почв на различных глубинах представлена на рисунках 1–4.

Для поверхностного слоя 0–5 см характерно плавное изменение твердости. По геостатистическим показателям такое свойство описывается значительным радиусом влияния – 27,02 м и высоким уровнем описательных способностей трендовой регрессионной модели ($R^2 = 0,25$). Очевидно, активное поверхностное перемещение почвенной массы приводит к выравниванию свойств почвы, в том числе и её твердости. Таким образом, в центральной восточной части полигона наблюдается область с пониженной твердостью (1,4–1,5 МПа), которая окружена областью с более высокими значениями твердости почвы (1,5–2,3 МПа).

Под слоем почвы 0–5 см наблюдается более структурированная картина изменчивости твердости почвы. Структурность проявляется в резком уменьшении радиуса влияния. На глубинах от 5 до 50 см этот показатель находится на уровне 1,55–2,61 м, что контрастирует со значением радиуса влияния на глубине 0–5 см. Выделяются области округло-овальной и звездчатой формы с повышенной твердостью, которые окружены почвой с меньшей твердостью.

Области с относительно однородными значениями твердости согласованы по горизонтам, поэтому их можно охарактеризовать как педоны. Ф. И. Козловским (1966) введено понятие «педон» как почвенный индивидуум. Педоном считается наименьший объем почвы, в котором эффективно усредняются пространственные неоднородности ближнего порядка почвенных свойств отдельных горизонтов или профиля в целом в относительно однородном почвенном покрове.

Необходимо отметить, что педоны имеют сложную 3D-геометрию. На глубинах 5–10 и 10–15 см участки с однородной твердостью ориентированы в направлении север – юг. В горизонте 15–20 см образования приобретают звездчатую структуру, так как сохраняют анизотропию в направлении север – юг, но приобретают анизотропию в направлении запад – восток. На глубине 20–25 и 25–30 см преобладает анизотропия в направлении запад – восток. На больших глубинах зоны однородной твердости приобретают очертания гребней сложной конфигурации.

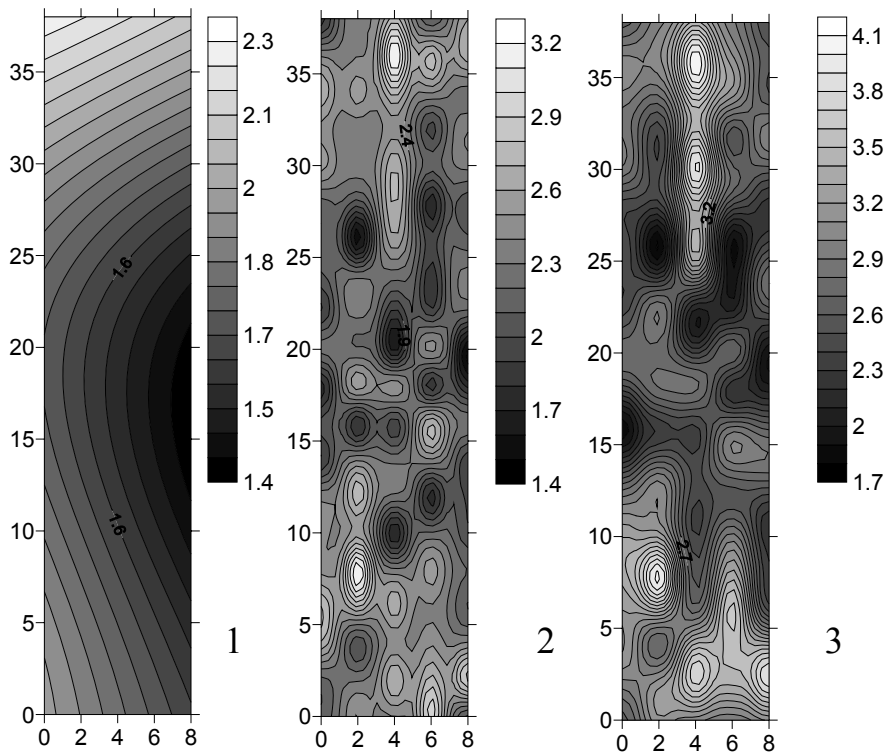


Рис. 1. Пространственное изменение твердости почвы (в МПа):
 1 – слой 0–5 см; 2 – слой 5–10 см; 3 – слой 10–15 см

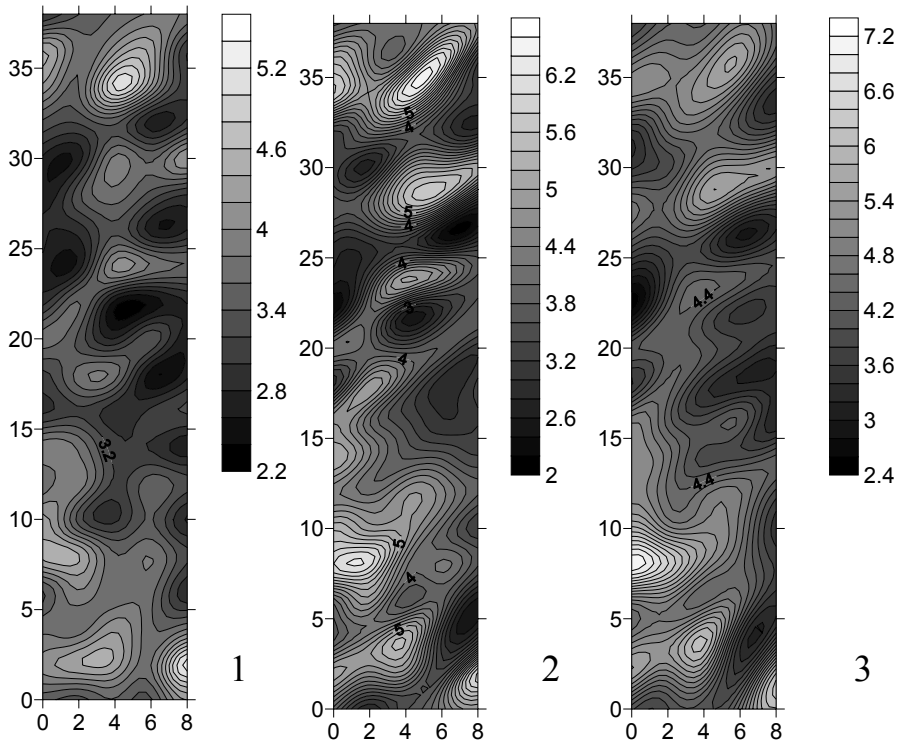


Рис. 2. Пространственное изменение твердости почвы (в МПа):
 1 – слой 15–20 см; 2 – слой 20–25 см; 3 – слой 25–30 см

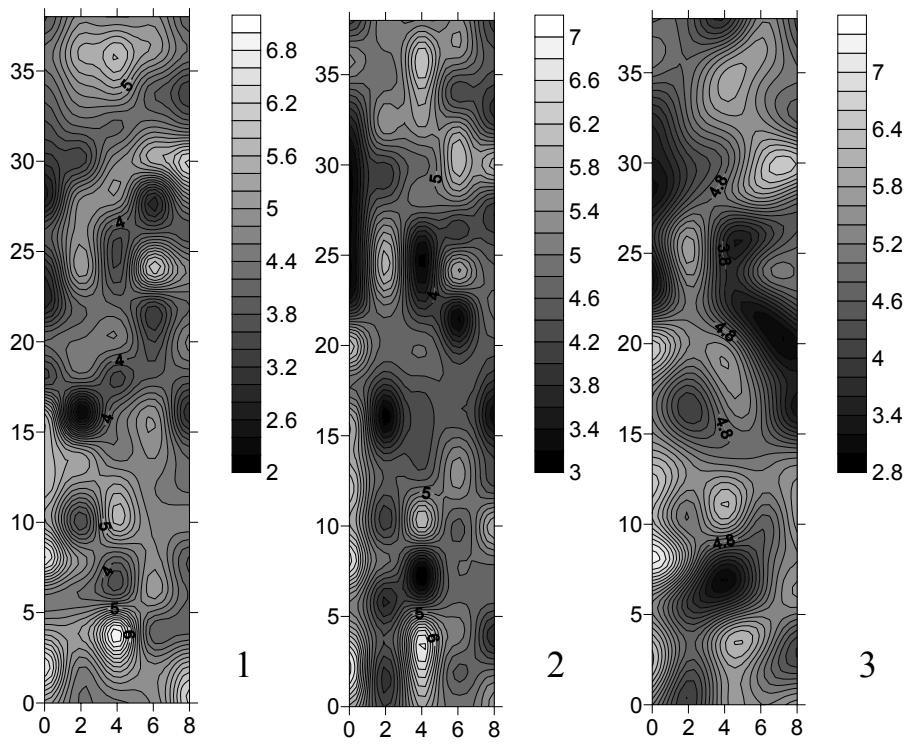
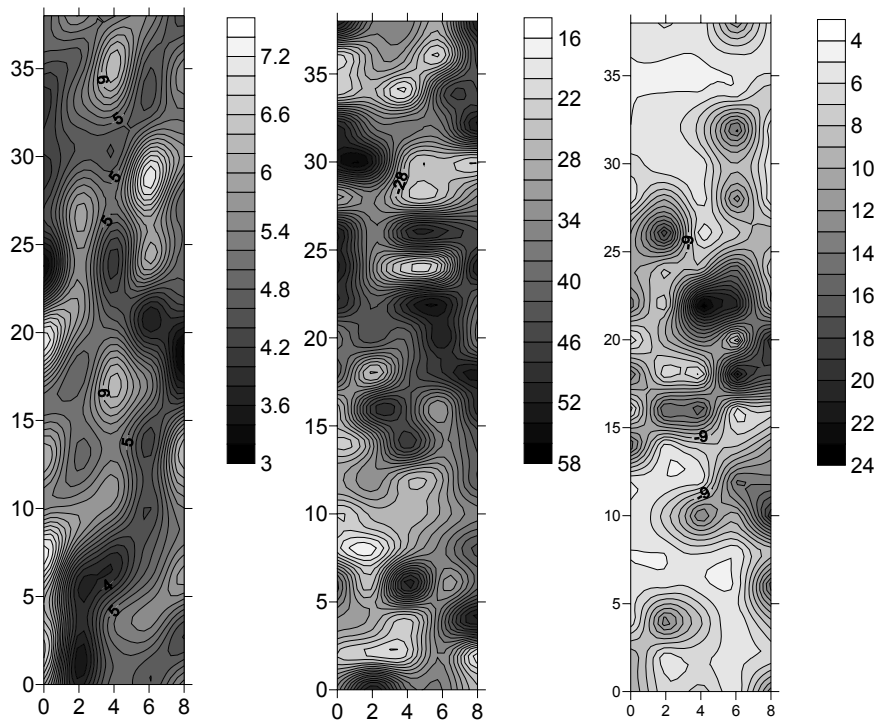


Рис. 3. Пространственное изменение твердости почвы (в МПа):
 1 – слой 30–35 см; 2 – слой 35–40 см; 3 – слой 40–45 см



**Рис. 4. Твердость почвы на глубине 50 см (слева, МПа),
 глубина твердости почвы 5 МПа (центр, см) и 2 МПа (справа, см)**

Твердость почвы может рассматриваться как фактор, ограничивающий рост корневых систем растений. Поэтому значение имеет карта изменчивости глубины, на которой наблюдается интересное значение твердости почвы. По данным различных исследователей, лимитирующее влияние твердость почвы оказывает при значениях 0,8–5 МПа. На рисунке 4 (центр и справа) показаны карты изменчивости глубины, на которых начинается твердость почвы выше 5 и 2 МПа.

Твердость 2 МПа наблюдается от глубины от 5,00 до 24,65 см, в среднем находится на уровне 8,55 см. Твердость 5 МПа наблюдается с глубины 15,00 см до 50,00, в среднем находится на уровне 36,22 см.

Между глубиной, на которой начинается твердость почвы 2 МПа, и проективным покрытием травянистой растительности, а также мощностью подстилки нет достоверной связи, как статистической ($r = 0,00$; $p = 0,99$ и $r = 0,16$; $p = 0,11$ соответственно), так и геостатистической (двумерный индекс I -Морана = $-0,02$; $p = 0,75$ и $0,05$; $p = 0,36$ соответственно). От глубины, на которой начинается твердость 5 МПа, зависит как проективное покрытие, так и мощность подстилки ($r = -0,32$; $p = 0,00$ и $r = 0,33$; $p = 0,00$; I -Морана = $-0,11$; $p = 0,00$ и $0,17$; $p = 0,00$).

Трофическая активность животных, оцененная с помощью приманочного теста, не реагирует на изменение глубины твердости почвы 2 МПа ($r = -0,02$; $p = 0,85$; I -Морана = $-0,02$; $p = 0,65$), но подвержена влиянию изменения глубины, на которой начинается твердость 5 МПа ($r = 0,25$; $p = 0,01$; I -Морана = $0,10$; $p = 0,03$).

Электропроводность статистически не зависит от глубины, на которой начинается твердость почвы 2 и 5 МПа ($r = 0,11$; $p = 0,30$ и $r = -0,15$; $p = 0,14$ соответственно). Однако геостатистики указывают на достоверное увеличение электропроводности почвы при уменьшении уровня, где начинается твердость почвы 2 МПа (I -Морана = $0,13$; $p = 0,00$) и увеличении уровня, где начинается твердость почвы 5 МПа (I -Морана = $-0,12$; $p = 0,00$).

Таким образом, в условиях пристенной дубравы проективное покрытие травянистой растительности тем меньше, чем ближе к поверхности почвы начинается её твердость, превышающая 5 МПа. Твердость 2 МПа такого влияния не оказывает. Вероятно, что локалитеты с пониженным проективным покрытием травянистой растительности накапливают подстилку с повышенной мощностью, вследствие чего между мощностью подстилки и твердостью почвы наблюдается отрицательная корреляционная связь. Соотношение между мертвым покровом и живой растительностью влияет на интенсивность трофической активности и на электропроводность почвы, чем обусловлено влияние твердости почвы на эти показатели.

Для проверки механизма связи между переменными была проведена процедура моделирования структурными уравнениями – SEPATH-анализ (рис. 5).

SEPATH-анализ позволяет проверить гипотезы о причинно-следственных связях между изучаемыми переменными, а также выявить и количественно оценить существенные факторы (латентные переменные), которые не наблюдаются непосредственно, но проявляют себя через поведение измеримых (манифестных) переменных.

Латентный фактор $v1$ (рис. 5) оказывает влияние на манифестные переменные – глубину, при которой твердость почвы становится равной 2 и 5 МПа (Depth_2M и Depth_5M). Регрессионные коэффициенты показывают, что индикаторная способность показателя Depth_5M для выявления латентного фактора гораздо выше (11,18), чем индикаторная способность показателя Depth_2M (коэффициент 1,06). Таким образом, латентный фактор $v1$ можно идентифицировать как ограничивающее влияние твердости почвы.

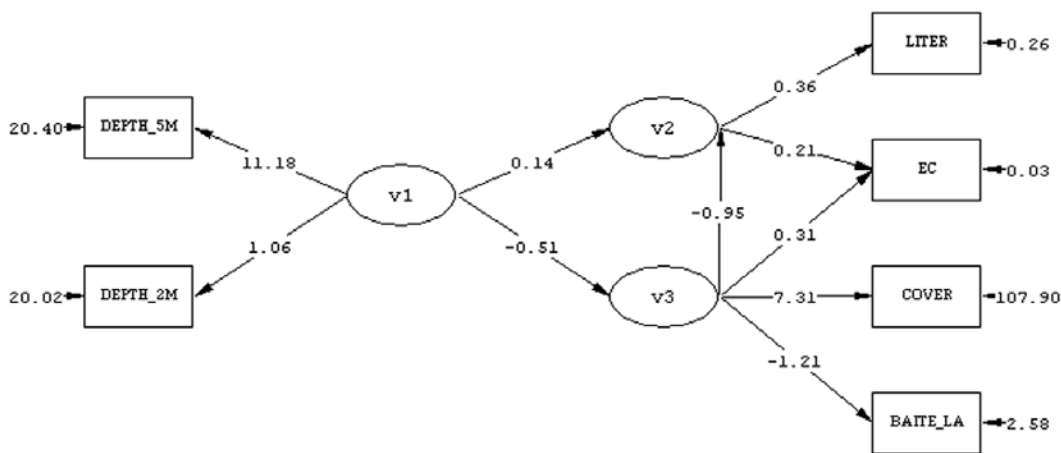


Рис. 5. Структурная модель взаимосвязи твердости почвы и экологических характеристик:

Depth_5M – глубина, на которой начинается твердость почвы 5 МПа; Depth_2M – глубина, на которой начинается твердость почвы 2 МПа; v_1 – v_3 – латентные переменные; Liter – мощность подстилки; EC – электропроводность; Cover – проективное покрытие растительности; Baite_la – трофическая активность почвенных животных по данным приманочного теста

Латентный фактор v_1 оказывает влияние на латентные факторы v_2 и v_3 . Латентный фактор v_2 индицируется по мощности подстилки (регрессионный коэффициент 0,36) и по электропроводности почвы (коэффициент 0,21), а фактор v_3 – по проективному покрытию (регрессионный коэффициент 7,31). Фактор подстилка (v_2) и фактор проективное покрытие растительности (v_3) влияют на электропроводность, а проективное покрытие – на трофическую активность почвенных животных. Наиболее существенным является тот результат, что полученная модель не противоречит гипотезе о негативном влиянии проективного покрытия на мощность подстилки. Модель с обратным направлением влияния (от v_2 к v_3) не является надежной.

Выводы

Твердость почвы в пристенной дубраве является важным фактором, который влияет на ряд существенных экологических свойств этого биогеоценоза. Лимитирующее значение для проективного покрытия травянистой растительности имеет глубина, с которой начинается твердость почвы 5 МПа. При приближении этого уровня к поверхности почвы проективное покрытие травянистой растительности сокращается. Проективное покрытие оказывает влияние на трофическую активность почвенных животных и электрическую проводимость почвы. Развитие растительного покрова оказывает ограничивающее влияние на мощность мертвого растительного покрова. Уменьшение проективного покрытия способствует росту мощности подстилки. Подстилка также оказывает влияние как на трофическую активность почвенных животных, так и на электропроводность почвы.

Библиографические ссылки

1. **Воробейчик Е. Л.** К методике измерения мощности лесной подстилки для целей диагностики техногенных нарушений экосистем // Экология. – 1997. – № 4. – С. 265–269.
2. **Воронов А. Г.** Геоботаника. – М. : Высшая школа, 1973. – 384 с.

3. **Козловский Ф. И.** Почвенный индивидуум и методы его определения // Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. – М. : Наука, 1970. – С. 42–59.
4. **Пространственная** экология почвенных животных / А. Д. Покаржевский, К. Б. Гонгальский, А. С. Зайцев, Ф. А. Савин. – М. : КМК, 2007. – 174 с.
5. **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.
6. **Atwell B. J.** The effect of compaction on wheat during early tillering: I. Growth, development and root structure // *New Phytology*. – 1990. – Vol. 115. – P. 29–35.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
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.
13. **Törne E.** Assessing feeding activities of soil-living animals. I. Bait-lamina-tests // *Pedobiologia*. – 1990. – Vol. 34. – P. 89–101.

Надійшла до редколегії 14.12.2010