

# ЛІСОВА ЕКОЛОГІЯ

УДК 630.18+581.5

А.К. Балалаев, И.А. Иванько

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СВЕТОВЫХ СТРУКТУР ФИТОЦЕНОЗОВ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕСНЫХ ЭДАФОТОПОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОМЕРНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

О.К. Балалаев, І.А. Іванько

*Дніпропетровський національний університет*

### АНАЛІЗ ВПЛИВУ СВІТЛОВИХ СТРУКТУР ФІТОЦЕНОЗІВ НА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛІСОВИХ ЕДАФОТОПІВ З ВИКОРИСТАННЯМ БАГАТОВИМІРНИХ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ

Висвітлено роль світлової структури насаджень у формуванні лісових ґрунтів. Виявлено взаємозв'язок між розподілом кореневої маси трав'янистих і деревних видів та вмістом гумусу і водотривких ґрунтових агрегатів.

*Ключові слова: світлова структура, маса коренів, гумус, водотривкість.*

A.K. Balalaev, I.A. Ivanko

*Dnepropetrovsk National University*

### MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS OF INFLUENCE OF LIGHT FRAMES OF PHYTOCENOSISES ON PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES FOREST EDAPHOTOPS

On the basis of methods of multifactor statistical analysis the role such as light structure of plantations in formation of physico-chemical properties of wood bedrocks is secured. The interrelation between allocation of mass of roots of herbaceous and arboreal kinds and contents of a humus and water-resistance of edaphic aggregates in range rizosphere is revealed.

*Key words: light structure, mass of roots, humus, water-resistance of edaphic aggregates.*

Произрастание искусственных лесных биогеоценозов в степной зоне базируется на их средопреобразующем влиянии на исходные почвенно-климатические условия (Зонн, 1951; Стадниченко, 1960; Травлеев, 1977; Новосад, 2001). Данное воздействие осуществляется прежде всего посредством изменения свето- и гидротермических параметров подпологового пространства, что отражается на процессах разложения и накопления лесной подстилки, развитии травяного покрова, характере распределения и накопления подземной фитомассы древесных и травянистых видов, формировании видового состава животного и микробного населения. Все данные процессы связаны с типом световой структуры насаждений, определяющим количество солнечной радиации, прошедшей через древесно-кустарниковый полог.

В задачу исследований входило выяснение на основе применения многофакторного статистического анализа степени воздействия типа световой структуры насаждений, а также содержания и распределения в почвенном профиле корневой массы древесных и травянистых видов на преобразование физико-химических свойств лесных почв.

При изучении средопреобразующего влияния насаждений на формирование лесных эдафотопов среди почвенных характеристик были исследованы: содержание и распределение общего гумуса (*Gu*), обменных оснований  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ , водопрочных агрегатов агрономических полезных фракций (2-1 мм, 1-0,5 мм, 0,5-0,25 мм), как наиболее показательных диагностических признаков состояния почвенного покрова, оказывающих непосредственное воздействие на развитие лесных культурбиогеоценозов.

Объектами исследований служили относящиеся к различным типам световых структур такие искусственные насаждения плакорных местообитаний:

– *осветленный тип световой структуры*. Искусственное полезащитное гледичиевое насаждение ПП 224Гл-И-1 (генеральный мониторинговый профиль № 2) локализовано в плакорных условиях в 2 км от с. Андреевка Новомосковского района Днепропетровской области. Увлажнение – атмосферное. Почвы – чернозем обыкновенный карбонатный среднегумусный среднесуглинистый на лессовидных суглинках. Возраст посадки –

18 лет. Тип посадки рядовой. Расстояние в рядах – 1,5 м. Междурядье также составляет 1,5 м. Высота деревьев 9-11 м. Средний диаметр – 15 см. Сомкнутость полога – 0,8.

$$\text{Типологическая формула: } \frac{\text{ЧОСГ}_1}{\text{Осв} - \text{П}} 10\text{Гл.}$$

Травостой имеет пятнисто-зарослевый и частично диффузный характер сложения. Господствующими видами, формирующими заросли, являются многолетние вегетативно-подвижные злаки;

– *гледичиевое поlezащитное насаждение* ПП 224Гл-И-2 осветленного типа световой структуры с нормальным световым состоянием. Локализовано в плакорных условиях в окрестностях с. Андреевка Новомосковского района Днепропетровской области. Увлажнение – атмосферное. Почвы – чернозем обыкновенный карбонатный среднегумусный среднесуглинистый на лессовидных суглинках. Возраст посадки – 20 лет. Тип посадки рядовой. Расстояние в рядах колеблется от 0,5 до 1,5 м. Междурядье – 1,5 м. Средняя высота деревьев – 11-13 м. Диаметр составляет 18-20 см. Сомкнутость полога – 0,9-1.

$$\text{Типологическая формула: } \frac{\text{ЧОСГ}_1}{\text{Осв} - \text{П}} 10\text{Гл.}$$

Травяной покров искусственного поlezащитного гледичиевого насаждения №2 осветленного типа световой структуры в настоящий период проходит вторую стадию развития и находится в пятнисто-зарослевой фазе сложения. Под пологом насаждения травостой представляет собой мятликово-осоково-пыреевую группировку из длиннокорневищных видов с единичным включением сорного, сорно-степного и сорно-лугового разнотравья;

– *полусветленный тип световой структуры*. Искусственное поlezащитное акациево-ясеневое лесонасаждение ПП 224АЯс-И-1 (генеральный мониторинговый профиль №2) локализовано на плакоре (имеется небольшой уклон южной экспозиции – 2-3°) в 3 км от с. Андреевка Новомосковского района Днепропетровской области. Увлажнение – атмосферное. Почвы – чернозем обыкновенный сильнокарбонатный среднегумусный среднесуглинистый на лессовидных суглинках. Возраст лесопосадки – 30 лет. Относится ко второй возрастной ступени и характеризуется максимальным смыканием крон. Тип посадки – рядовой, где чередуются ряды *Robinia pseudoacacia* и *Fraxinus lanceolata*. Ширина междурядий – 2 м, расстояние в рядах – 1,5 м. Высота деревьев ясеня – 8-10 м, акации – 13-14 м. Средний диаметр акации 15 см, ясеня – 10 см. Сомкнутость полога – 0,8-0,9.

$$\text{Типологическая формула по А.Л. Бельгарду (1960): } \frac{\text{ЧОСГ}_1}{\text{П / осв} - \text{П}} 5\text{Ак} * 5\text{Яс.}$$

Травяной покров имеет куртинный характер с большим преобладанием мертвопокровных участков. В нем доминируют лесные и сорно-лесные виды;

– *теневой тип световой структуры*. Искусственное дубовое лесонасаждение ПП 224Д-И локализовано на плакоре водораздела в окрестностях с. Всесвятское Новомосковского района Днепропетровской области. Имеется небольшой уклон северной экспозиции (2-3°). Увлажнение – атмосферное. Почвенные условия – чернозем обыкновенный слабовыщелоченный среднегумусный среднесуглинистый на лессовидных суглинках. Возраст – 45 лет. Кустарниковый подлесок представлен *Acer tataricum*, *Euonymus europaea*, *E. verrucosa*, *Ligustrum vulgare*, *Malus sylvestris*, *Cotinus coggygria*. Тип посадки – рядовой. Ряды дуба черешчатого чередуются с рядами кустарников. Расстояние в рядах дуба – 0,75 м, между рядами – 3 м. Дубы часто суховершинят, средняя высота составляет 12 м, диаметр – 16 см. Выпадение деревьев дуба в рядах – 6-7%.

$$\text{Типологическая формула: } \frac{\text{ЧОСГ}_1}{\text{Тен} - \text{П}} 10\text{Д.}$$

Вырубка кустарникового подлеска из клена татарского и естественное выпадение бересклета европейского и скумпии козевой привело к изменению режимов освещенности и формированию двух основных парцелл: дубово-кустарниково-мертвопокровной (70% площади) – меланизированное (ослабленное) световое состояние и дубово-разнотравно-злаковой (30%) – усиленное световое состояние.

Общая сомкнутость полога, включая кустарниковый подлесок, в мертвопокровной парцелле составляет 0,8-0,9, в разнотравно-злаковой (без кустарникового подлеска) – 0,5-0,6. Травостой имеет куртинный характер со значительной долей участия сорно-лесных и лесных видов.

Полученные данные обрабатывались дисперсионным анализом с целью проверить статистическую значимость различия между средними значениями (для групп или переменных). При таком методе проверка проводится с помощью разбиения общей дисперсии на части, одна из которых обусловлена случайной ошибкой, а вторая связана с различием средних значений. Последняя компонента дисперсии затем используется для анализа статистической значимости различий между средними значениями. Необходимо отметить что, переменные, значения которых определяются с помощью измерений в ходе эксперимента, являются зависимыми. Переменные, которые влияют на условия эксперимента называются факторами или независимыми переменными. Более подробно основные понятия дисперсионного анализа описаны в многочисленных литературных источниках (Лакин, 1990; Уилкс, 1967).

В нашем случае в качестве воздействующих факторов использовались: 1 – тип световой структуры насаждений; 2 – наличие либо отсутствие корневых систем травянистых видов в почвенных педонах; 3 – глубина залегания горизонта. Оценку нормальности распределения переменных можно выполнить по форме гистограмм, приведенных на рис. 1. Результаты расчетов представлены в табл. 1 для шести зависимых переменных.

Во всех случаях (кроме  $Ca^{2+}$ ) наблюдается высокий уровень значимости всех трех факторов и взаимодействия типа световой структуры с наличием травянистых корней. Отсутствие воздействия вышеуказанных факторов на изменчивость содержания обменного  $Ca^{2+}$  объясняется сильным отклонением от нормального распределения выборки (рис. 1, *f*), что связано с перераспределением кальция по профилю в процессе выщелачивания. Однако мы предполагаем наличие связи с представленными воздействующими факторами, но для доказательства взаимодействия необходимо применение непараметрического дисперсионного анализа.

Таблица 1

Значения коэффициента Фишера и уровня значимости воздействия 3 факторов и их комбинаций на зависимые переменные

Факторы	Переменные						Фракция агрегатов, мм					
	$Ca^{2+}$		$Mg^{2+}$		Gu		$B_1, 2-1$		$B_2, 1-0,5$		$B_3, 0,5-0,25$	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
1	1,28	0,28	27,4	<b>3,43E-09</b>	70,05	<b>2,03E-16</b>	15,97	<b>2,7E-06</b>	16,49	<b>1,96E-06</b>	7,27	<b>0,002</b>
2	0,20	0,65	9,73	<b>0,003</b>	9,04	<b>0,004</b>	5,11	<b>0,027</b>	11,36	<b>0,0013</b>	10,12	<b>0,002</b>
3	1,02	0,37	3,30	<b>0,002</b>	41,56	<b>1,6E-22</b>	3,96	<b>0,0005</b>	4,82	<b>7,45E-05</b>	2,96	<b>0,006</b>
1*2	0,75	0,48	6,48	<b>0,003</b>	8,12	<b>0,001</b>	4,22	<b>0,019</b>	8,34	<b>0,001</b>	1,24	0,266
1*3	0,63	0,86	1,12	0,354	1,48	0,128	0,47	0,960	0,39	0,984	1,01	0,464
2*3	0,29	0,97	0,89	0,534	0,24	0,987	0,38	0,942	0,28	0,977	0,48	0,880
1*2*3	0,54	0,92	0,64	0,849	0,24	0,999	0,33	0,994	0,72	0,777	0,21	0,100

Примечание: *F* – коэффициент Фишера, *p* – уровень значимости (< 0,05 выделен полужирным шрифтом).

Анализ коэффициента Фишера (*F*), который, как известно, равен отношению дисперсии фактора к дисперсии ошибки, позволяет выявить наибольшее значение, соответствующее воздействию типа световой структуры насаждений на все переменные, кроме тонкой фракции водопрочных почвенных агрегатов (0,5-0,25 мм). Причем воздействие первого фактора (типа световой структуры) настолько сильное, что в комбинации со вторым (наличием корневых систем травянистых видов) дает достоверно значимые значения. Вторым по значимости фактором является наличие травянистых корневых систем, кроме случая с распределением гумуса (*Gu*), где более значимый фактор – глубина

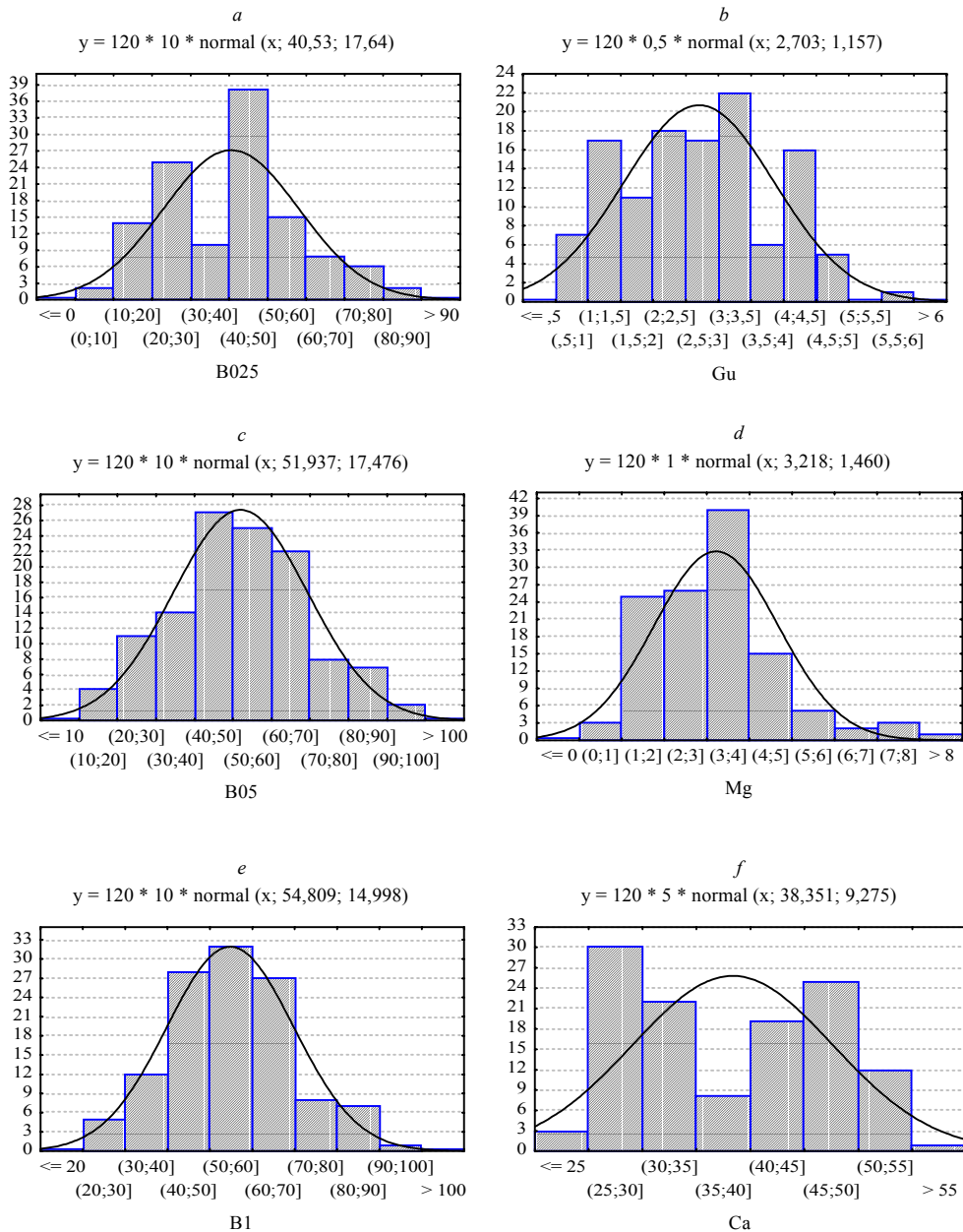


Рис. 1. Гистограммы распределения выборок шести переменных в виде столбчатых диаграмм и их теоретические графики плотности нормального распределения

залегания горизонта. Это явление можно объяснить активным биогенным накоплением гумуса в верхних почвенных горизонтах и закономерным уменьшением его количества вниз по профилю. В данном процессе большую роль играют накопление и трансформация лесной подстилки, корневые системы древесных видов, не учитываемые в данном анализе. Более сложно объяснить различия в значениях коэффициента Фишера в изменчивости количества тонкой фракции водопрочных агрегатов (0,5-0,25 мм) по сравнению с более крупными фракциями. Мы считаем, что механизмы формирования мелких и крупных фракций имеют различную природу. Более, чем с другими факторами, распределение тонкой фракции водопрочных агрегатов связано с наличием корневых систем травянистых видов.

Небольшие значения коэффициента Фишера для типа световой структуры и глубины залегания почвенного горизонта позволяют предположить существование дополнительного ведущего фактора, влияющего на изменчивость данной фракции, не учтенного в анализе.

При выяснении степени связи между исследуемыми признаками появляется необходимость получения числовых коэффициентов для описания силы взаимодействия. В простейшем случае (2 признака) в качестве такого параметра применяется коэффициент корреляции или же, в случае нескольких признаков, – таблицы взаимной корреляции. Простым коэффициентом взаимной корреляции объяснить сложные взаимосвязи природных систем достаточно сложно. Поэтому в данной работе применялся канонический корреляционный анализ, который предназначен для анализа зависимостей между двумя множествами переменных. Подробнее можно узнать в источниках (Кульбак, 1967; Уилкс, 1967).

Анализ проводился на основе данных, полученных при изучении насаждений со сниженной освещенностью (ПП 224Д-И и 224АЯс-И-1), характеризующихся куртинным характером травяного покрова и сходными почвенно-климатическими характеристиками в пределах насаждения. Перед нами была поставлена задача выяснить взаимосвязь между содержанием и распределением корневых систем травянистых и древесных видов с физико-химическими параметрами почв в области ризосферы в пределах куртин доминирующих видов травостоя.

В первую группу признаков отнесены массы подземных органов травянистых (МТ) и древесных (МД) видов. Во вторую, зависимую от первой, включены физико-химические свойства почв: содержание общего гумуса (*Gu*), обменных оснований  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ , водопрочных агрегатов агрономически полезных фракций (2-1 мм; 1-0,5 мм; 0,5-0,25 мм) (табл. 2).

Таблица 2

**Значения коэффициентов канонических переменных в двух группах признаков**

Первая		Вторая					
МТ	МД	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	<i>Gu</i>	$B_1$ (2-1 мм)	$B_2$ (1-0,5 мм)	$B_3$ (0,5-0,25 мм)
-0,7	1,63	-0,56	-0,37	0,81	0,61	-0,50	-0,39

Высокий канонический коэффициент корреляции (его значение 0,8;  $\alpha = 0,007$ ) свидетельствует о тесной линейной связи между группами. Каноническое уравнение корреляции можно записать в виде линейной комбинации признаков:

$$1,63МД - 0,7МТ = 0,81 Gu - 0,56 Ca^{2+} - 0,37 Mg^{2+} + 0,61 B_1 - 0,5 B_2 - 0,39 B_3.$$

Анализируя значения коэффициентов (весов) при переменных, можно заметить, что воздействие массы древесных корней в 2,3 раза сильнее, чем травянистых на все признаки из второй группы. Во второй группе наибольшие веса отмечены для распределения гумуса и водопрочных почвенных агрегатов крупной фракции (коэффициенты с одинаковыми знаками), что свидетельствует о том, что эти два параметра тесно взаимосвязаны друг с другом и признаками первой группы. Закономерности изменений более мелких фракций водопрочных агрегатов несколько другие (с противоположным знаком), что подтверждается результатами дисперсионного анализа, приведенными ранее.

Так как рассматриваемая нами система является взаимообусловленной, то не только параметры 1-й группы влияют на признаки 2-й группы, но наличествует и обратный процесс. Оказывая положительное воздействие на накопление гумуса и образование водопрочной почвенной структуры, содержание и распределение корней находится в прямой зависимости от гидротермических и физико-химических свойств почв. Знак минус перед коэффициентом массы подземных органов травянистых видов можно рассматривать как показатель различий в профильном распределении массы травянистых и древесных корней, что связано с подземной ярусностью и конкуренцией в пределах одного горизонта почвы.

Корреляции между исследуемыми признаками можно объяснить с помощью факторного анализа. Он позволяет сократить число переменных и определить структуру взаимосвязей между ними. Поэтому факторный анализ используется либо как метод редукции данных, либо как метод классификации. В литературе подробно описываются принципы факторного анализа и способы его применения для достижения этих двух целей (Факторный ..., 1989; Харман, 1972). Нас в первую очередь интересует задача вычисления структуры взаимосвязей признаков исследуемых объектов. В качестве исходной системы нами рассматривается почвенный горизонт в пределах педонов насаждений различных типов световых структур, который характеризуется набором признаков, включающих физико-химические и биологические свойства. В расчетах использовались стандартизированные переменные, применялся метод главных компонент с *varimax* вращением главных осей. Выбор был сделан в пользу анализа 4 ортогональных (независимых) факторов на основании визуального анализа графика (рис. 2). Выше 4-го фактора собственные значения меняются незначительно. Факторная структура приведена в табл. 3.

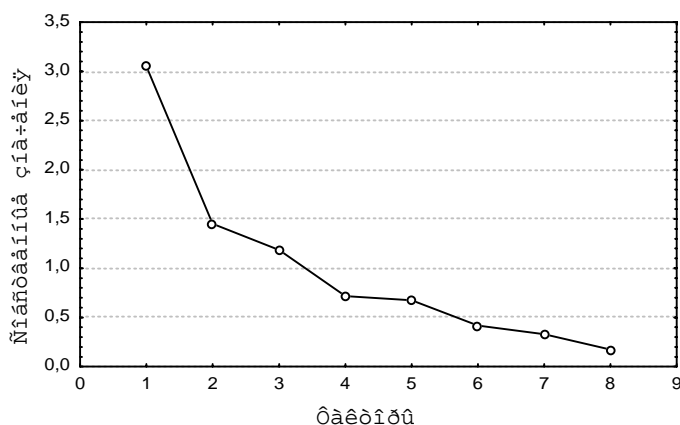


Рис. 2. График зависимости изменения собственных значений при добавлении факторов

Таблица 3

Нагрузки 4 факторов на изучаемые признаки

Признаки	Фактор			
	1	2	3	4
Дисперсия, %	38,15	18,14	14,82	8,96
Ca <sup>2+</sup>	-0,244	<b>-0,696</b>	-0,223	0,457
Mg <sup>2+</sup>	-0,108	<b>0,921</b>	-0,109	0,162
Gu	<b>0,804</b>	0,095	0,077	0,001
B <sub>1</sub> (2-1 мм)	<b>0,806</b>	-0,046	0,142	0,425
B <sub>2</sub> (1-0,5 мм)	<b>0,794</b>	-0,055	0,262	0,188
B <sub>3</sub> (0,5-0,25 мм)	0,405	0,028	0,074	<b>0,766</b>
MT	0,220	0,005	<b>0,789</b>	0,385
MD	0,138	0,002	<b>0,906</b>	-0,167

Самый сильный латентный фактор описывает 38,15 % дисперсии признаков. Его воздействие более всего проявляется в динамике содержания гумуса, а также водопрочных агрегатов более крупных фракций (2-1 мм и 1-0,5 мм). К сожалению, не существует способов конкретизировать, какой именно из существующих природных факторов оказывает данное воздействие. Можно лишь констатировать сопряженное и однонаправленное изменение этих признаков, связанное с влиянием того или иного фактора. По нашему мнению, первым по силе влияния фактором является процесс аккумуляции

и трансформации органических веществ в почве, т. к. именно он обуславливает накопление гумуса и улучшение почвенной структуры. С более общей точки зрения, результаты вышеприведенных анализов указывают на то, что подобное влияние может оказывать тип световой структуры насаждений, во многом определяющий направленность и интенсивности круговорота веществ и энергии в пределах лесных культурбиогеоценозов.

Второй по значимости фактор, не зависящий от первого, описывает 18,14 % дисперсии признаков. Вероятно, данный фактор описывается процессами накопления и миграции химических веществ почвы, чему свидетельствуют высокие факторные нагрузки у обменных оснований  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ .

Третий по силе воздействия (14,8 % дисперсии) фактор, очевидно, связан с видовым составом древостоя и травостоя, так как максимум факторных нагрузок приходится на изменение количества корней в почвенных горизонтах, основные особенности архитектуры которых определяются видовой принадлежностью растений, и уже во вторую очередь – спецификой почвенных условий.

И, наконец, четвертый – самый малозначимый из рассмотренных (8,9 % дисперсии признаков) фактор интересен тем, что имеет высокую факторную нагрузку на изменчивость тонкой фракции водопрочных почвенных агрегатов (0,5-0,25 мм). Как и в вышеприведенных анализах, наблюдаются иные закономерности в содержании и распределении данной фракции в почвенных профилях искусственных лесных насаждений по сравнению с более крупными агрегатами. Предположительно, особенности формирования водопрочных агрегатов этого размера тонко связаны с незначительными изменениями в механическом составе почвы, так как исследуемые насаждения произрастают в идентичных почвенных условиях обитания, незначительно отличающихся по гранулометрическому составу. Возможна связь с особенностью архитектуры корневых систем травянистых видов, присущих тому или иному типу насаждений.

#### *Заключение*

1. В общем положительном преобразовании физико-химических свойств лесных эдафотопов в степи ведущая роль принадлежит типу световой структуры насаждений (на основе дисперсионного анализа).

2. Специфическое средообразующее влияние на формирование почвенного покрова искусственных лесонасаждений оказывает развитие древостоя и травяного яруса. На основе дисперсионного анализа установлено, что наличие корневых систем травянистых видов статистически значимо связано с изменениями гумусного и структурного состояния почв.

3. Исходя из результатов канонического корреляционного анализа установлена тесная взаимосвязь между распределением массы корневых систем древесных и травянистых видов, а также содержанием и распределением гумуса и водопрочных почвенных агрегатов агрономически полезных фракций (2-1; 1-0,5 и 0,5-0,25 мм).

4. Различными статистическими подходами выявлено различие в закономерностях формирования и распределения в почвенных педонах лесных культурбиогеоценозов водопрочных агрегатов тонкой (0,5-0,25 мм) и более крупных фракций (2-1 и 1-0,5 мм).

Для более детального выяснения биологической сущности исследуемых явлений необходимо проведение дополнительных экспериментальных и модельных опытов, направленных на дальнейшее изучение выявленных закономерностей. При проведении аналогичных исследований возможно получение несколько иных численных показателей в результатах статистической обработки, особенно при изменении объема выборки, но выявленные тенденции, по нашему мнению, остаются достоверными.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Зонн С.В. Лесорастительные свойства почв и взаимодействие лесных насаждений с почвами при степном лесоразведении // Научные вопросы лесозащитного лесоразведения. – М., 1951. – С. 38-83.

Кульбак С. Теория информации и статистика. – М.: Наука, 1967. – 408 с.

Лакин Г. Ф. Биометрия. – М.: Высш. шк., 1990. – 352 с.

- Новосад К.Б. Еволюція чорноземів під лісовими фітоценозами // Грунтознавство. – 2001. – Т. 1., № 1-2. – С. 62-74.
- Стадниченко В.Г. Почвы искусственных лесов степной зоны УССР // Искусственные леса степной зоны Украины. – Харьков, 1960. – С. 75-84.
- Травлев А.П. Характеристика почв лесных культурбиогеноценозов настоящих степей УССР // Вопросы степного лесоведения и охраны природы: Тр. Комплексной экспедиции ДГУ. – Д., 1977. – Вып. 7. – С. 8-21.
- Уилкс С. Математическая статистика. – М.: Наука, 1967. – 632 с.
- Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.О. Ким, Ч.У. Мюллер, У.Р. Клекка и др. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
- Харман Г. Современный факторный анализ. – М.: Статистика, 1972. – 486 с.

*Надійшла до редколегії 25.08.02*