

УДК 592 + 519.6

А. Е. Пахомов<sup>1</sup>, д-р биол. наук, проф., Ю. Л. Кульбачко<sup>1</sup>, канд. биол. наук, доц., О. А. Дидур<sup>2</sup>, канд. биол. наук, мл. науч. сотр.

<sup>1</sup>Днепропетровский национальный университет, биолого-экологический факультет, кафедра зоологии и экологии, пр. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, 49050

<sup>2</sup>Днепропетровский национальный университет, НИИ биологии, e-mail: a.pakhomov@i.ua; didur@ua.fm

### ИЗМЕНЕНИЕ БИОМАССЫ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ДВУПАРНОНОГИХ МНОГОНОЖЕК (*DIPLOPODA*) НА ИСКУССТВЕННЫХ ПОЧВОГРУНТАХ В МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

В работе изучалось совместное воздействие шахтной породы, почвенной массы чернозема обыкновенного и подстилки робинии псевдоакации на биомассу представителей *Diplopoda*. Получена математическая модель, описывающая изменение биомассы кивсяков от состава смеси. Отмечено достоверное уменьшение массы тела *Diplopoda*, обитающих на шахтной породе, и увеличение при добавлении к компонентам смеси (шахтной породе и чернозему) листового опада робинии.

**Ключевые слова:** двупарноногие многоножки, искусственные почвогрунты, модельный эксперимент.

#### Введение

Ускоренные темпы развития современного техногенеза оказывают все более глубокое и разнообразное воздействие на природные ландшафты. В результате разработки угольных месторождений на месте естественных ландшафтов формируются отвально-карьерные комплексы, которые проходят две фазы развития: техногенного преобразования и посттехногенного [1]. Огромные конусообразные терриконы из породы, частиц угля и шлака не только способствуют отторжению плодородных земель, но и значительно ухудшают санитарно-гигиенические условия местности, представляют определенную опасность для здоровья людей [2]. Помочь решению этой проблемы может проведение биологической и, в частности, лесной рекультивации нарушенных территорий.

Основной задачей лесной рекультивации является создание устойчивого культурбиогеноценоза. Учитывая, что горная порода терриконов, как и выбросы крупных промышленных предприятий [3, 4], токсична и негативно влияет на представителей фито-, зоо- и микробиоценоза, при проведении лесной рекультивации зачастую приходится использовать различные варианты искусственных почвосмесей. Впоследствии они становятся средой обитания представителей почвенных беспозвоночных, которых можно рассматривать как один из важнейших элементов формирующегося зооценоза.

В почвах встречается огромное число представителей разных таксономических групп. Почвенная фауна представляет собой облигатный структурно-функциональный компонент почвы. Ее представители, адаптированные к жизни в почве, активно влияют на формирование почвенного профиля, круговорот орга-

нических, токсических веществ в нем. Каждой размерной группе беспозвоночных присуще свое, специфическое распределение в почвенных горизонтах [5].

В последние годы особое внимание на рекультивированных территориях уделяется выявлению общих закономерностей в изменениях растительных и животных сообществ. Так, синэкологические характеристики представителей почвенной мезофауны, включающие в себя оценку динамики численности, биомассы, видового разнообразия, структуры доминирования, соотношения биоморф дают наиболее полное представление о характере ее становления на нарушенных почвах.

Одним из важных показателей состояния сообщества той или иной группы почвенных беспозвоночных служит изменение биомассы ее представителей. Этот показатель может быть использован в оценке пригодности искусственной почвосмеси для оптимального существования представителей различных размерных групп (в частности мезофауны) почвенных беспозвоночных.

Нами был проведен лабораторный эксперимент с целью выявления влияния искусственных почвогрунтов на представителей почвенных сапрофагов.

#### Материал и методы исследования

Большинство из окружающих нас в природе (и применяемых в технике) веществ являются смесями разнообразных компонентов. С такими системами повсеместно приходится сталкиваться при решении различных задач химии, физической технологии, металлургии, промышленности строительных материалов, биологии и др. Таковы, например, горные породы, руды и минералы, стекла, технические сплавы, строительные материалы и др.

Естественно, что свойства подлежащих обработке смесей будут зависеть не только от природы и относительного содержания составляющих смесь компонентов, но и от условий обработки – температуры, давления, физического состояния веществ, наконец от наличия растворителей и примесей. Изменением пропорций (относительного содержания) отдельных компонентов, то есть изменением состава многокомпонентной системы, а также режима обработки (воздействия), можно придать смеси желаемые свойства [6–8].

Для изучения многофакторных систем наиболее целесообразным является применение статистических методов планирования эксперимента. Под планированием эксперимента понимают процесс определения числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью [9–11].

Целью исследования сложных многокомпонентных систем обычно является построение зависимостей свойств от состава и режима обработки, нахождение оптимального состава и режима, удовлетворяющих требованиям по одному или нескольким выходным параметрам (свойствам системы). Эти многокомпонентные системы удобно исследовать, используя методы математического планирования эксперимента для изучения и оптимизации сложных систем с ограничениями на переменные – так называемого планирования эксперимента на диаграммах состав–свойство [12 и др.].

Для установления влияния трехкомпонентной смеси, включающей шахтную породу ( $x_1$ ), почвенную массу чернозема обыкновенного ( $x_2$ ) в качестве субстрата, содержащего гумус, подстилку из листьев робинии псевдоакация ( $x_3$ ) на биомассу такого типичного сапрофага как кивсяк, был проведен лабораторный эк-

сперимент. План эксперимента приведен ниже (табл. 1). В каждой точке плана было реализовано по два параллельных опыта.

Исследование проведено в течение одного месяца (с 10.10.07 по 10.11.07). Для создания оптимального водного обеспечения условий обитания животных имитировали выпадение осадков 35 мм/30 дней.

Таблица 1

Матрица планирования и обозначение откликов

Номер опыта	План (состав смеси, доля единицы)			Отклик
	Шахтная порода ( $x_1$ )	Почвенная масса чернозема обыкновенного ( $x_2$ )	Подстилка ложно-акациевая ( $x_3$ )	
1	1	0	0	$y_1$
2	0	1	0	$y_2$
3	0	0	1	$y_3$
4	0,5	0,5	0	$y_{12}$
5	0,5	0	0,5	$y_{13}$
6	0	0,5	0,5	$y_{23}$
7	0,333	0,333	0,333	$y_{123}$
8	0,15	0,595	0,255	Проверочная точка
9	0,3	0,49	0,21	Проверочная точка

Переменные  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, q$ ) таких систем являются пропорциями (относительным содержанием)  $i$ -х компонентов смеси и удовлетворяют условию

$$\sum_{1 \leq i \leq q} x_i = 1 \quad (x_i \geq 0).$$

Первые 6 опытов представляют собой симплекс-решетчатый план типа {3, 2}, где 3 – количество компонентов, 2 – степень полинома. На приведенном ниже тернарном графике отмечены точками координаты эксперимента. Отклики  $y_{12}$ ,  $y_{13}$  и  $y_{23}$ , образующие квадратическую решетку, получены добавлением к линейным решеткам срединных точек сторон (рис. 1). Это означает, что отклику  $y_{12}$  соответствует содержание в смеси 50 % шахтной породы (1-й компонент) и 50% почвенной массы чернозема (2-й компонент), отклику  $y_{13}$  – смесь из 50% шахтной породы (1-й компонент) и 50% подстилки (3-й компонент) и т. п. Добавив к такой квадратической решетке всего лишь одну точку в центре тяжести симплекса – отклик  $y_{123}$ , которому отвечает 33,3%-ный состав всех смесовых компонентов, – получаем неполно-кубическую решетку.

Для проверки адекватности полученной модели были реализованы опыты в трех проверочных точках (опыты № 7, 8, 9). Такие проверочные точки позволяют расширить модель до неполной кубической, адекватно описывающей экспериментальные результаты.

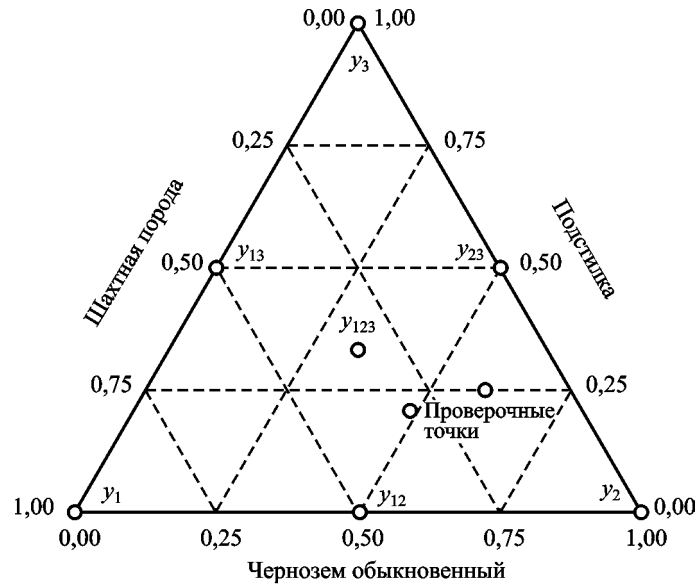


Рис. 1. Геометрическая интерпретация плана эксперимента на симплекс-решетке с обозначениями откликов

### Результаты и их обсуждение

Результаты эксперимента приведены в табл. 2. В крайнем правом столбце таблицы указаны средние значения прибавки массы животного, найденные как разница между массой животного до начала опыта и после него.

Таблица 2

Результаты планирования – изменение биомассы животного-сапрофага

Номер опыта	Состав смеси (доля единицы)			Отклик
	Шахтная порода ( $x_1$ )	Почвенная масса чернозема обыкновенного ( $x_2$ )	Подстилка из листьев белой акации ( $x_3$ )	Средняя прибавка массы за 1 месяц, г ( $n = 9$ экз.) ( $y$ )
1	1	0	0	- 0,48
2	0	1	0	0,04
3	0	0	1	1,04
4	0,5	0,5	0	- 0,04
5	0,5	0	0,5	- 0,12
6	0	0,5	0,5	0,94
7	0,333	0,333	0,333	0,14
8	0,15	0,595	0,255	0,36
9	0,3	0,49	0,21	- 0,04

После реализации матрицы планирования были рассчитаны коэффициенты полинома третьей степени и построено уравнение регрессии вида

$$y = -0,425x_1 + 0,085x_2 + 1,04x_3 - 1,66x_1x_3$$

( $R^2$  с учетом степеней свободы = 93,2 %),

где  $y$  – прибавка массы кивсяков, г;  $x_1$  – относительное содержание шахтной породы в смеси;  $x_2$  – относительное содержание чернозема в компонентной смеси;  $x_3$  – относительное содержание листового опада в трехкомпонентной системе. Модель описывает характер и степень влияния факторов на зависимую переменную. Эффект взаимодействия  $y_1y_2$  исключен из модели, поскольку его уровень значимости равен 0,37. Эффекты факторов и их взаимодействий после исключения были пересчитаны и приведены в табл. 3. Большая величина коэффициента детерминации  $R^2$  показывает что полученная неполная кубическая модель вполне работоспособна. Проверка модели также показала, что она адекватна ( $\alpha = 0,004$ ), то есть приемлемо согласуется с экспериментальными значениями.

Таблица 3

Эффекты и их статистическая оценка

Линейные эффекты и их взаимодействия	Коэффициент	Уровень значимости $\alpha$ для эффектов взаимодействия
$y_1$	- 0,425	
$y_2$	0,085	
$y_3$	1,04	
$y_1y_2$	искл.	-
$y_1y_3$	- 1,66	0,048
$y_2y_3$	1,51	0,061
$y_1y_2y_3$	- 3,21	0,340

Анализ уравнения регрессии показывает, что достоверно значимыми являются следующие факторы – воздействие шахтной породы, чернозема и лесной подстилки и их эффект – взаимодействие шахтной породы и подстилки (табл. 3). Значимость эффекта от взаимодействия чернозема и подстилки приближается к 0,06, что позволяет отметить это взаимодействие лишь в качестве приближенной тенденции. Установлено, что, вынужденно обитая на шахтной породе, животные теряют массу ( $-0,425x_1$ ). Если сапрофаг существует на таком субстрате как чернозем, то наблюдается небольшое по величине положительное приращение массы ( $+0,085x_2$ ). Но самая большая прибавка массы сапрофага характерна для условий их обитания на подстилке ( $+1,04x_3$ ). При взаимодействии в смеси шахтной породы и подстилки возникает отрицательный эффект, приводящий к тому, что животные теряют свою массу ( $-1,66x_1x_3$ ). В этом эффекте знак «минус», скорее всего, связан именно с наличием в смеси шахтной породы. Вопрос о том, какой компонент в этом взаимодействии приводит к большей убыли (или прибавке) массы тела не корректен, поскольку при перемножении долей даже в случае их перестановки (например 10% породы и 70% подстилки, либо наоборот), количественный эффект будет одинаков:  $-1,66 \times 0,10 \times 0,70 = -1,66 \times 0,10 \times 0,70$ .

Тройной эффект от взаимодействия между собой шахтной породы, чернозема и подстилки оказался статистически незначимым.

Рассмотрим изменение массы животных при одновременном уменьшении в смеси относительного содержания шахтной породы и увеличении содержания подстилки (табл. 4). Установлено, что как только в смеси увеличивается доля подстилки (например, от 50 до 85%) и снижается доля шахтной породы (от 25 до 5%), наблюдается положительный прирост массы тела животных.

Таблица 4

**Изменение массы организмов при варьировании факторов**

Порода			Подстилка			Почвенная масса чернозема обыкновенного		
%	Эффект	Δ, г	%	Эффект	Δ, г	%	Эффект	Δ, г
25	- 0,11	-	50	0,52	-	25	0,02	-
20	- 0,08	0,03	70	0,73	0,21	10	0,01	- 0,01
5	- 0,02	0,09	85	0,88	0,36	10	0,01	- 0,01

При увеличении содержания породы и уменьшении в смеси доли подстилки (табл. 5) происходит закономерная убыль массы тела животных. Такая реакция организмов естественна на ухудшение экологических условий обитания.

Таблица 5

**Изменение массы организмов при варьировании факторов**

Порода			Подстилка			Почвенная масса чернозема обыкновенного		
%	Эффект	Δ, г	%	Эффект	Δ, г	%	Эффект	Δ, г
40	- 0,17	-	20	0,21	-	30	0,03	-
70	- 0,29	- 0,12	10	0,10	- 0,11	20	0,02	- 0,01
85	- 0,36	- 0,19	5	0,05	- 0,16	10	0,01	- 0,02

Интересно отметить, что наблюдаемый эффект от воздействия почвенной массы чернозема на массу сапрофагов на порядок ниже, чем от воздействия подстилки (табл. 6). Его величина мала и варьирует в очень узком диапазоне.

Таблица 6

**Изменение массы организмов при варьировании факторов**

Порода			Подстилка			Почвенная масса чернозема обыкновенного		
%	Эффект	Δ, г	%	Эффект	Δ, г	%	Эффект	Δ, г
5	- 0,02	-	5	0,05	-	90	0,08	-
10	- 0,04	- 0,02	30	0,31	0,26	60	0,05	- 0,03
70	- 0,29	- 0,27	10	0,10	0,05	20	0,02	- 0,06

Согласно полученному уравнению регрессии, была построена поверхность отклика (рис. 2). Она позволяет визуально оценить влияние факторов на параметр оптимизации – изменение биомассы животного – в любой области

факторного пространства. Видно, что отклик имеет нелинейную зависимость, вносимую за счет эффекта взаимодействия шахтной породы и листового опада ( $x_1, x_3$ ).

На рисунке отчетливо виден максимальный эффект изменения биомассы представителей *Diplopoda* при преобладании в трехкомпонентной смеси (шахтная порода, подстилка, чернозем) подстилки из опада робинии, а минимальный – шахтной породы. Такие изменения биомассы отражают в целом жизненное состояние представителей блока сапрофагов на примере двупарноногих многоножек.

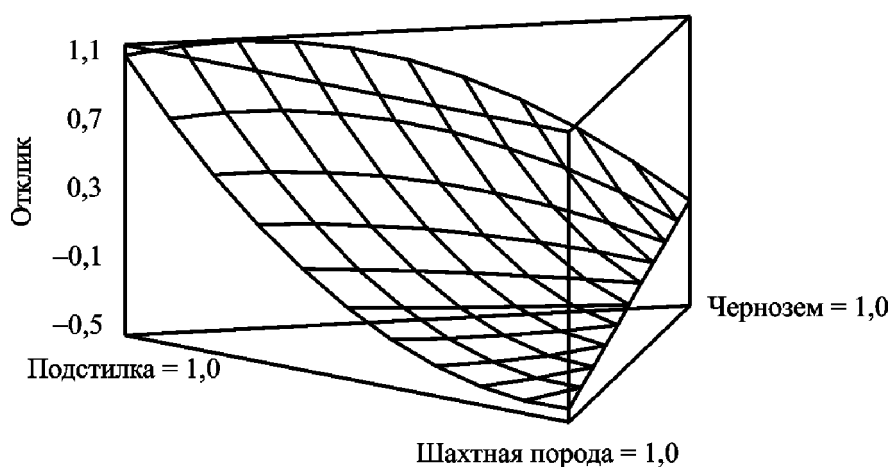


Рис. 2. Поверхность отклика для исследованной трехкомпонентной системы

## Выводы

Экспериментально изучено влияние искусственных почвосмесей, которые могут возникать в результате посттехногенного преобразования земель, на представителей почвенных беспозвоночных на примере двупарноногих многоножек.

Выявлены такие сочетания почвосмесей, которые оказывают значимое влияние на изменение биомассы животных-сапрофагов (кивсяков).

Получена математическая модель, описывающая зависимость биомассы кивсяков от экспериментальных факторов.

Отмечено достоверное уменьшение массы тела зоопредставителей, обитающих на шахтной породе, и увеличение – при добавлении к компонентам смеси (шахтной породе и чернозему) листового опада робинии псевдоакации.

## Литература

1. Глебова О. И. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов лесостепной зоны Кузбасса // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель: Материалы Междунар. науч. конф. – Екатеринбург, 2007. – С. 169–177.

2. Глазырина М. А. К вопросу восстановления фиторазнообразия на терриконах угольных шахт Урала / М. А. Глазырина, Н. В. Лукина, Т. С. Чибрик // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель: Материалы Междунар. науч. конф. – Екатеринбург, 2007. – С. 149–167.
3. Воробейчик Е. Л. Население дождевых червей (*Lumbricidae*) лесов Среднего Урала в условиях загрязнения выбросами металлургических комбинатов // Экология. – 1989. – № 2. – С. 102–108.
4. Воробейчик Е. Л. Реакция лесной подстилки и ее связь с почвенной биотой при токсическом загрязнении // Лесоведение. – 2003. – № 2. – С. 32–42.
5. Смирнов Ю. Б. Некоторые зооэкологические и биохимические показатели почвенных беспозвоночных на участках рекультивации Западного Донбасса // Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель. – Д.: ДНУ, 2002. – Вип. 6. – С. 140–149.
6. Верзилов В. В. Влияние компонентов муки на рост и нуклеазную активность актиномицетов / В. В. Верзилов, В. Н. Максимов, Н. А. Красильников // Заводская лаборатория. – 1972. – № 6. – С. 877–881.
7. Маркова Е. В. Применение частично сбалансированного неполноблочного плана для исследования физико-механических свойств резиновых смесей / Е. В. Маркова, С. Н. Путилина, И. С. Борисенко // Заводская лаборатория. – 1972. – № 10. – С. 1234–1239.
8. Селезнев В. А. Оптимизация процесса раскисления спокойной углеродистой стали / В. А. Селезнев, А. Н. Сургучев, Н. П. Литвиненко и др. // Заводская лаборатория. – 1973. – Т. 39, № 3. – С. 327–328.
9. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
10. Налимов В. В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 207 с.
11. Томашевский В. М. Моделирование систем. – К.: Видавнична група ВНУ, 2005. – 352 с.
12. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 390 с.

**О. Є. Пахомов, Ю. Л. Кульбачко, О. О. Дідур**

Дніпропетровський національний університет, біолого-екологічний факультет, кафедра зоології та екології, пр. Гагарина, 72, г. Дніпропетровськ, 49050, Україна

**ЗМІНА БІОМАСИ ПРЕДСТАВНИКІВ ДВОПАРНОНОГИХ БАГАТОНІЖОК (*DIPLOPODA*) НА ШТУЧНИХ ҐРУНТАХ У МОДЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАХ**

**Резюме**

Вивчали сумісний вплив шахтної породи, ґрунтової маси чорнозему звичайного та підстилки робінії псевдоакації на біомасу представників *Diplopoda*. Створено математичну модель, що відображає зміну біомаси ківсяків від складу суміші. З'ясовано достовірне зменшення маси тіла *Diplopoda*, які мешкають на шахтній породі, і збільшення при додаванні до компонентів суміші (шахтній породі і чорнозему) листяного опаду робінії.

**Ключові слова:** двопарноногі багатоніжки, штучні ґрунти, модельний експеримент.



**A. Ye. Pakhomov, Yu. L. Kul'bachko, O. A. Didur**

Dnipropetrovsk National University, Faculty of Biology,  
Department of Zoology and Ecology,  
Gagarin str., 72, Dnipropetrovsk, 49050, Ukraine

**VARIABILITY DYNAMICS OF MILLIPEDES (*DIPLOPODA*) BIOMASS IN ARTIFICIAL SOIL'S IN THE MODEL EXPERIMENTS**

**Summary**

Mutual influence of mining rock, chernozem soil and litter of *Robinia pseudoacacia* L. on *Diplopoda* biomass has been studied. Mathematical models reflected the dependence of vegetable-eating milliped's biomass changing upon experimental factors (blends composition) is presented. Significant decrease of body mass of the millipeds inhabited on mining gobs and its increase in response to adding of *Robinia pseudoacacia* L. leaf litter to the soil blend were found.

**Keywords:** *Diplopoda*, artificial soils, model experiments.