

**ЕКОЛОГІЯ ФІТОСФЕРИ**

УДК 504.064.2

*Т. І. Кривомаз, О. С. Волошкіна,  
Д. В. Максименко, О. Г. Жукова  
Київський національний університет  
будівництва та архітектури*

**РЕГРЕСІЙНІ МОДЕЛІ ПЕРЕХОДУ ЕЛЕМЕНТІВ В МІКСОМІЦЕТАХ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ПАРАМЕТРІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

За допомогою програмного пакету Statistica проаналізовано репрезентативну вибірку що включає 52 зразки 28 видів міксоміцетів, зібраних у кардинально відмінних екотопах міських територій (м. Київ), гірських екосистем (Карпати і Альпи) та тропічних островів (Сейшели). Для з'ясування трансформації елементів міксоміцетами в навколишньому середовищі побудовано математичні моделі біоаккумуляції елементів, в залежності від їх концентрації в міксоміцетах, субстратах, ґрунті та його рухомих формах, повітрі та дощовій воді. Встановлено, що на рівень Са в досліджених зразках міксоміцетів впливають всі проаналізовані фактори. Концентрація Mn залежить від його вмісту у повітрі та рухомих формах ґрунту, Pb – в дощовій воді, ґрунті та його рухомих формах. Для As та Fe найкращими предикторами виявились субстрат та ґрунт, субстрат також відіграє вирішальну роль у зміні вмісту Al та Cd, а ґрунт вагомо впливає на концентрацію Ni в міксоміцетах. Отримані моделі дозволяють з'ясувати шляхи надходження токсичних елементів у біооб'єкти та прогнозувати довгострокові ефекти техногенного впливу на стан екологічної безпеки навколишнього середовища.

**Ключові слова:** екологічна безпека, міксоміцети, метали, математичне моделювання

С помощью программного пакета Statistica проанализировано репрезентативную выборку, включающую 52 образца 28 видов миксомицетов, собранных в кардинально отличных экотопах городских территорий (г. Киев), горных экосистем (Карпаты и Альпы) и тропических островов (Сейшелы). Для выяснения трансформации элементов миксомицетами в окружающей среде построены математические модели биоаккумуляции элементов, в зависимости от их концентрации в миксомицетах, субстратах, почве и ее подвижных формах, воздухе и дождевой воде. Установлено, что на уровень Са в исследованных образцах миксомицетов влияют все проанализированные факторы. Концентрация Mn зависит от его содержания в воздухе и подвижных формах почвы, Pb – в дождевой воде, почве и ее подвижных формах. Для As и Fe лучшими предикторами оказались субстрат и почва, субстрат также играет решающую роль в изменении содержания Al и Cd, а почва весомо влияет на концентрацию Ni в миксомицетах. Полученные модели позволяют выяснить пути поступления токсичных элементов в биообъекты и прогнозировать долгосрочные эффекты техногенного воздействия на состояние экологической безопасности окружающей среды.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, миксомицеты, металлы, математическое моделирование

With the Statistica software package the representative selection was analyzed. It is including 52 sample of myxomycetes 28 species collected in fundamentally different ecotypes, such as urban areas (Kiev), mountain ecosystems (Carpathian and Alps) and the tropical islands (Seychelles). The mathematical models bioaccumulation elements, depending on their concentration in Myxomycetes, substrates, soil and moving it forms the air and rain water were built for determination the way of

elements transformation in the environment myxomycetes. It is found that Ca levels affecting all analyzing factors in the samples examined myxomycetes. Mn concentration depends on its content in the air and moving forms of soil, Pb – in rainwater, soil and its mobile forms. The best predictors for As and Fe were substrate and the soil, substrate also plays a crucial role in changing the contents of Al and Cd, and the soil weighty impact on the Ni concentration in the myxomycetes. These models allow find out the input way of toxic elements to biological objects and it predict long-term effects of anthropogenic impact on the ecological safety condition of the environment.

**Keywords:** environmental safety, myxomycetes, metals, mathematical modeling

**Постановка проблеми.** Вирішення проблеми забруднення важкими металами навколишнього середовища є одним з важливих завдань екобезпеки. Живі організми відіграють ключову роль в перерозподілі металів, виступаючи як в ролі своєрідних геохімічних бар'єрів, так і в якості біоконцентраторів хімічних елементів. Зокрема міксоміцети (Myxomycetes – представники підвідділу Macromycetozoa відділу Mucetozoa підцарства Conosa царства Amoebozoa субдомену Amorphea домену Eukarya), завдяки тісному зв'язку з ґрунтом, рослинними залишками та обмеженій території переміщення, відображають фактичний рівень локального забруднення екосистем і можуть виступати у ролі біоіндикаторів важких металів [5].

**Аналіз останніх досліджень.** Незважаючи на актуальність теми та потенціал міксоміцетів до накопичення важких металів, існує всього кілька публікацій, присвячених дослідженню вмісту металів у зразках міксоміцетів [1, 2, 3, 7, 8, 11], і тільки в одній порівнюється концентрація металів у міксоміцетах та їх субстратах [2]. Методи математичного моделювання для з'ясування рівня забруднення навколишнього середовища за допомогою міксоміцетів застосовано для єдиного виду *Fuligo septica* [3]. В процесі формалізованого математичного представлення функціонування біосистем виникають методологічні проблеми, пов'язані їх складністю біооб'єктів та неможливістю урахування всіх процесів, що відбуваються в реальних умовах. При цьому математичні методи відрізняються точністю і чіткістю формулювання, тому моделювання є дієвим засобом управління екологічною безпекою, якщо моделі мають конкретні цілі, представляють компактний опис спостережень, аналізують та пояснюють реальні явища, забезпечують прогнозування природних процесів та результатів техногенного впливу. З огляду на це, для з'ясування трансформації елементів міксоміцетами в навколишньому середовищі обрано програмний пакет Statistica, який включає широкий набір аналітичних процедур та методів, що дозволяє на основі експериментальних даних побудувати прогностичні моделі з високим ступенем вірогідності для покращення наукових основ управління екологічною безпекою.

**Мета дослідження.** Визначити зв'язки між концентраціями металів в міксоміцетах, їх субстратах, ґрунті, рухомих формах ґрунту, дощовій воді та повітрі для з'ясування шляхів надходження токсичних елементів.

**Матеріали та методи.** Для з'ясування трансформації елементів міксоміцетами в навколишньому середовищі застосовано програмний пакет Statistica, за допомогою якого проаналізовано репрезентативну вибірку що включає 52 зразки 28 видів міксоміцетів, зібраних у кардинально відмінних екотопах міських територій (м. Київ), гірських екосистем (Карпати і Альпи) та тропічних островів (Сейшели). Вимірювання концентрацій елементів здійснено за допомогою методу атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою. Закономірності розподілу елементів в навколишньому середовищі виявлено шляхом порівняння концентрацій елементів в міксоміцетах, їх субстратах, валових та рухомих формах ґрунту, повітрі та атмосферних опадах. Проби повітря відбирались на фільтрувальний папір протягом 10 днів в чашках Петрі. Проби дощової води збирались в пластикові контейнери по мірі випадання опадів та зберігались в холодильнику до проведення аналізів. Особливості морфології міксоміцетів визначали з використанням методів трансмісійної світлової мікроскопії [6]. Дослідження вмісту

хімічних елементів здійснювалось методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою [10]. В процесі моделювання в програмі Statistica розраховано такі коефіцієнти:

- 1) коефіцієнт детермінації  $R^2$ , величина якого демонструє ступінь достовірності моделі, тобто параметри регресії відбирались так, щоб  $R^2$  максимально наближався до 1;
- 2) коефіцієнт множинної кореляції  $R = \sqrt{R^2}$ , який характеризує тісноту зв'язку між предикторами та оцінює якість передбачення в межах від 0 до 1;
- 3) скориговане  $R^2$  ( $Adjusted\ R^2$ )  $= 1 - (1 - R^2)(n/(n-k))$ , де  $k$  – число параметрів у регресійному рівнянні;
- 4) стандартизований регресійний ваговий коефіцієнт  $Beta$  (похибка  $BetaStEr$  – *Standard Error of Beta*), який дає можливість порівняти внески кожного предиктора в передбачення, що дозволяє провести ранжування предикторів за ступенем їх впливу;
- 5) нестандартизований регресійний ваговий коефіцієнт  $B$  (похибка  $BStEr$  – *Standard Error of B*);
- 6) частковий коефіцієнт кореляції *Partial Correlation (ParC)*, на основі якого визначається доцільність включення предикторів в модель;
- 7) напівчастковий коефіцієнт кореляції *Semipartial Correlation (SParC)* визначає вплив інших предикторів на даний предиктор;
- 8)  $t$ -критерій – значення критерію Стюдента для перевірки гіпотези про значущість часткового коефіцієнту кореляції з вказаною в дужках кількістю ступенів свободи [4].

При побудові моделей враховуються значення множинного коефіцієнту кореляції ( $R$ ), тобто відсоток даних, які коректно описує дана модель. В оберненій залежності від надійності результату знаходиться показник  $P$ -рівня значущості, що відображає імовірність помилковості даної моделі. Якщо  $P$  дорівнює 0,05 (тобто 1/20), це показує, що існує 5% ймовірність того, що знайдений у вибірці зв'язок між змінними є лише випадковою особливістю даної вибірки. Моделі в програмі Statistica побудовано так, щоб  $R > 0,8$ , а  $P < 0,05$ . Для виявлення залежностей між концентраціями в міксоміцетах, їх субстратах, валових та рухомих формах ґрунту, повітрі та атмосферних опадах використано коефіцієнт рангової кореляції Спірмена, який є непараметричним аналогом коефіцієнту Пірсона, що можна застосовувати для невеликих вибірок даних:

$$P = 1 - \frac{6 \times \sum D^2}{n \times (n^2 - 1)} \quad (1)$$

де  $n$  – об'єм вибірки,  $D$  – різниця між рангами двох змінних. Кількісна міра зв'язку оцінюється по абсолютному значенню коефіцієнту від 0 до 1. Коефіцієнт кореляції рангу Спірмена оцінює, наскільки адекватно можна описати відношення між двома змінними за допомогою монотонної функції [4]. Дослідження проводилось на кафедрі охорони праці та навколишнього середовища факультету інженерних систем та екології Київського національного університету будівництва і архітектури.

**Результати.** Шляхом множинного регресійного аналізу отримані рівняння, які наочно показують ступінь впливу досліджених факторів навколишнього середовища на зміну концентрацій елементів в міксоміцетах, що дозволяє оцінювати довгостроковий ефект забруднення навколишнього середовища. Лінійна множинна регресійна модель у загальному вигляді представлена таким рівнянням:

$$C_m = b_0 + b_1 \cdot C_{sub} + b_2 \cdot C_{soil} + b_3 \cdot C_{SMF} + b_4 \cdot C_{rw} + b_5 \cdot C_{air}, \quad (2)$$

де  $C_m$  – концентрація елементу в міксоміцетах,  $C_{sub}$  – в субстратах,  $C_{soil}$  – у ґрунті,  $C_{SMF}$  – в рухомих формах ґрунту,  $C_{rw}$  – в дощовій воді,  $C_{air}$  – у повітрі,  $b_0$  – вільний член (*Inter* – *Intercept*) та  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  – параметри регресії, які розраховано на основі експериментальних даних.

За допомогою модуля множинної регресії в програмі Statistica отримано параметри для лінійної моделі накопичення Ca міксоміцетами в залежності від концентрації цього елементу у субстраті, ґрунті та його рухомих формах, повітрі та дощовій воді (табл. 1):

$$C_m(Ca) = 211898 - 0,5 \cdot C_{sub} + 5,6 \cdot C_{soil} - 25,4 \cdot C_{SMF} - 8,7 \cdot C_{air} - 10296 \cdot C_{rw} \quad (3)$$

Таблиця 1

### Результати регресійного аналізу для Ca

Ca	Regression Summary for Dependent Variable: $C_m(Ca)$ $R = 0,90$ $R^2 = 0,81$ $Adjusted R^2 = 0,76$ $F(5,18) = 15,55$ $p < 0,00001$							
	<i>Beta</i>	<i>BetaStEr</i>	<i>B</i>	<i>BStEr</i>	<i>t(18)</i>	<i>p-level</i>	<i>ParC</i>	<i>SParC</i>
<i>Inter</i>	--	--	211898	25955	8	0	--	--
$C_{sub}$	-0,27	0,14	-0,5	0,29	-1,89	0,07	-0,41	-0,19
$C_{soil}$	0,64	0,31	5,6	2,7	2,07	0,05	0,44	0,21
$C_{SMF}$	-0,78	0,35	-25,4	11,54	-2,2	0,04	-0,46	-0,22
$C_{air}$	-0,89	0,14	-8,7	1,4	-6,25	0,00001	-0,83	-0,64
$C_{rw}$	-0,83	0,2	-10296	2495	-4,13	0,0006	-0,7	-0,42

Коефіцієнт детермінації  $R^2$  (0,81) вказує на те, що понад 80% мінливості рівня концентрації Ca в досліджених зразках міксоміцетів можна описати за допомогою запропонованої моделі. Коефіцієнт множинної кореляції  $R = 0,9$  свідчить про тісний зв'язок між предикторами. Виходячи з величини стандартизованого регресійного вагового коефіцієнту *Beta*, ранг ступеню впливу предикторів на передбачення концентрації Ca в досліджених міксоміцетах зменшується таким чином:  $C_{air}$  (-0,89) >  $C_{rw}$  (-0,83) >  $C_{SMF}$  (-0,78) >  $C_{soil}$  (0,64) >  $C_{sub}$  (-0,27). Тобто рівень цього елементу в міксоміцетах пропорційно збільшується в залежності від концентрації Ca в ґрунті та пропорційно зменшується у відповідності до концентрації в повітрі, дощовій воді, рухомих формах ґрунту та субстратах. Частковий коефіцієнт кореляції *Partial Correlation* також підтверджує доцільність включення в модель в першу чергу концентрацію Ca в повітрі ( $ParC_{air} = -0,83$ ), а найменше на концентрацію цього елементу в міксоміцеті впливає його вміст в субстраті ( $ParC_{sub} = -0,41$ ).

Шляхом множинного регресійного аналізу з'ясовано, що на концентрацію Al в досліджених міксоміцетах істотно впливає тільки вміст цього елементу в субстратах (табл. 2), а тому модель лінійної регресії має такий вигляд:

$$C_m(Al) = 1,2 \cdot C_{sub} \quad (4)$$

Таблиця 2

### Результати регресійного аналізу для Al

Al	Regression Summary for Dependent Variable: $C_m(Al)$ $R = 0,86$ $R^2 = 0,74$ $Adjusted R^2 = 0,72$ $F(1,13) = 37,63$ $p < 0,00004$					
	<i>Beta</i>	<i>BetaStEr</i>	<i>B</i>	<i>BStEr</i>	<i>t(13)</i>	<i>p-level</i>
$C_{sub}$	0,86	0,14	1,2	0,19	6,13	0,00004

Низькі значення часткових коефіцієнтів кореляції *Partial Correlation* для ґрунту, повітря і дощової води показали недоцільність їх включення до рівняння лінійної регресії. Це свідчить про те, що концентрація Al в міксоміцетах зростає в залежності від вмісту цього металу у субстраті.

Шляхом множинного регресійного аналізу з'ясовано, що для концентрації As у досліджених міксоміцетах більш впливовим фактором є його концентрація у субстратах, причому із збільшенням As в субстратах збільшується його вміст і в міксоміцетах (табл. 3). Натомість, зв'язок з концентрацією в ґрунті виявився менш впливовим і вміст As в міксоміцетах пропорційно зменшується при підвищенні його рівня в ґрунті, тому модель лінійної регресії має такий вигляд:

$$C_m(As) = 9,45 \cdot C_{sub} - 0,35 \cdot C_{soil} \quad (5)$$

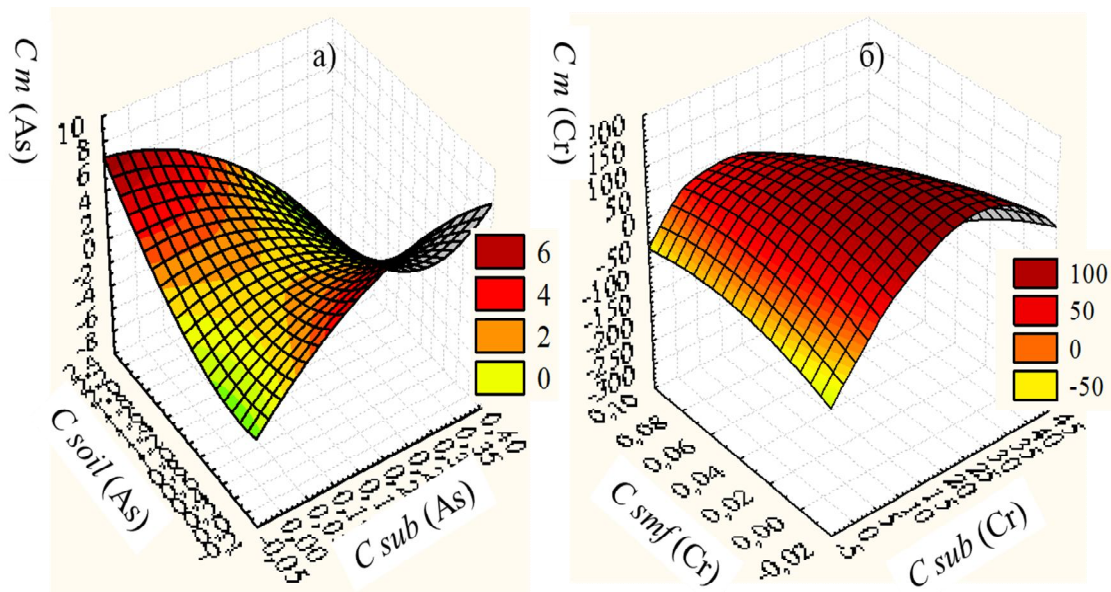
При цьому напівчастковий коефіцієнт кореляції  $SParC$  вдвічі менший за частковий коефіцієнт кореляції  $ParC$  для ґрунту, що дозволяє припустити самостійний вплив даного фактору на концентрацію As в міксоміцетах незалежно від інших предикторів.

Таблиця 3

**Результати регресійного аналізу для As**

N=18	Regression Summary for Dependent Variable: $C_m$ (As)							
	$R=0,91$ $R^2=0,83$ $Adjusted\ R^2=0,81$ $F(2,16)=38,73$ $p<0,0000001$							
As	Beta	BetaStEr	B	BStEr	t(16)	p-level	ParC	SParC
$C_{sub}$	1,29	0,21	9,45	1,57	6,04	0,00002	0,83	0,62
$C_{soil}$	-0,46	0,21	-0,35	0,16	-2,17	0,046	-0,48	-0,22

За допомогою модуля «3D поверхня» програми Statistica методом зважених відстаней отримано моделі залежностей концентрацій As від його концентрацій в ґрунті та в субстраті, який показує, що значне накопичення цього елемента міксоміцетами відбувається лише при істотній різниці його вмісту між ґрунтом і субстратом (рис. 1.а).



**Рис. 1. Моделі 3D залежностей концентрацій в міксоміцеті: а) As від його концентрацій в ґрунті та в субстраті, б) Cr від його концентрацій в рухомих формах ґрунту та в субстраті**

Аналіз кореляцій Спірмена показав, що концентрація Cr в міксоміцетах істотно залежить лише від його концентрацій в субстраті та рухомих формах ґрунту. Згідно прогнозу 3D моделі (рис. 1.б), максимальне накопичення Cr міксоміцетами відбувається при його концентраціях в субстраті  $15 < C_{sub} < 35$  мкг/г, а якщо  $C_{sub}$  залишається незмінною при одночасному збільшенні  $C_{SMF}$ , рівень Cr в міксоміцетах зменшується. Стандартизований регресійний ваговий коефіцієнт  $Beta$  показує, що на концентрацію Cd в міксоміцетах істотно впливає тільки вміст цього елемента в субстратах (табл. 4).

Таблиця 4

**Результати регресійного аналізу для Cd**

N=24	Regression Summary for Dependent Variable: $C_m$ (Cd)							
	$R=0,81$ $R^2=0,66$ $Adjusted\ R^2=0,59$ $F(4,20)=9,65$ $p<0,00016$							
Cd	Beta	BetaStEr	B	BStEr	t(20)	p-level	ParC	SParC
$C_{sub}$	0,81	0,17	1,31	0,28	4,7	0,0001	0,72	0,61
$C_{soil}$	0,15	0,15	0,45	0,45	1	0,33	0,22	0,13
$C_{air}$	-0,38	0,19	-96,54	48,87	-1,98	0,06	-0,40	-0,26
$C_{SMF}$	0,26	0,17	13,01	8,74	1,49	0,15	0,32	0,19

Загалом модель лінійної регресії для Cd у досліджених зразках міксоміцетів має такий вигляд:

$$C_m(Cd) = 1,31 \cdot C_{sub} \quad (6)$$

Вміст Fe в досліджених міксоміцетах суттєво залежить від концентрації цього металу в субстраті та дещо менше – в ґрунті, при чому на останній фактор інші предиктори впливають несуттєво (табл. 5):

$$C_m(Fe) = 5001 + 8,86 \cdot C_{sub} - 1,68 \cdot C_{soil} \quad (7)$$

Регресійний аналіз впливу концентрації Cu в досліджених складових навколишнього середовища дозволив побудувати таку модель накопичення цього металу міксоміцетами (табл. 6):

$$C_m(Cu) = 10,7 + 1,39 \cdot C_{sub} - 25,17 \cdot C_{rw} - 1,12 \cdot C_{air} \quad (8)$$

Таблиця 5

### Результати регресійного аналізу для Fe

N=24	Regression Summary for Dependent Variable: $C_m(Fe)$ $R=0,77$ $R^2=0,59$ $Adjusted\ R^2=0,55$ $F(2,21)=14,96$ $p<0,00009$							
	Fe	Beta	BetaStEr	B	BStEr	t(21)	p-level	ParC
Inter	--	--	5001	1861	2,69	0,014	--	--
$C_{sub}$	0,73	0,15	8,86	1,77	5	0,0001	0,74	0,70
$C_{soil}$	-0,51	0,15	-1,68	0,48	-3,48	0,0022	-0,60	-0,49

Таблиця 6

### Результати регресійного аналізу для Cu

N=24	Regression Summary for Dependent Variable: $C_m(Cu)$ $R=0,78$ $R^2=0,61$ $Adjusted\ R^2=0,55$ $F(3,20)=10,22$ $p<0,00027$							
	Cu	Beta	BetaStEr	B	BStEr	t(20)	p-level	ParC
Inter	--	--	10,70	3,01	3,55	0,002	--	--
$C_{sub}$	0,49	0,15	1,39	0,42	3,29	0,004	0,59	0,46
$C_{rw}$	-0,70	0,22	-25,17	7,89	-3,19	0,005	-0,58	-0,45
$C_{air}$	-0,67	0,21	-1,12	0,36	-3,14	0,01	-0,57	-0,44

Стандартизовані регресійні вагові коефіцієнти  $Beta$  дають можливість здійснити ранжування предикторів за ступенем їх впливу:  $C_{rw} > C_{air} > C_{sub}$ . Тобто атмосферні опади та атмосферне повітря більше впливають на концентрацію Cu в міксоміцетах, причому в зворотній залежності, на відміну від субстратів, де при зростанні концентрації металу впливає на його збільшення в досліджених міксоміцетах. При цьому всі фактори досить тісно взаємопов'язані, про що свідчить відносно невелика різниця у значеннях часткових та напівчасткових коефіцієнтів кореляції. Моделі 3D залежностей концентрацій Cu в міксоміцеті від концентрацій в субстраті, дощовій воді та повітрі наочно демонструють, що коли  $C_{sub}$  змінюється від 2 до 5 мкг/г, незалежно від рівня елементу у дощовій воді, то міксоміцети практично не накопичують мідь. Але концентрація Cu в міксоміцетах різко зростає, якщо концентрація цього елементу в дощовій воді знаходиться в межах  $0,15 < C_{rw} < 0,25$  мкг/г, а  $C_{sub}$  зменшується до нуля, або перевищує 7 мкг/г (рис. 2).

За допомогою модуля множинної регресії в програмі Statistica отримано лінійну модель накопичення Mn міксоміцетами:

$$C_m(Mn) = 1798 + 42,91 \cdot C_{air} - 214,5 \cdot C_{SMF} \quad (9)$$

Згідно отриманим узагальнюючим розрахункам, концентрація Mn в міксоміцетах збільшується при зростанні вмісту цього елементу в повітрі, а при його меншому рівні в рухомих формах ґрунту зареєстровані більші значення концентрацій в досліджених спорофорах (табл. 7). Оскільки  $ParC$  та  $SParC$  майже співпадають, це свідчить що ні  $C_{air}$ , ні  $C_{SMF}$  не мають самостійного впливу на  $C_m(Mn)$ .

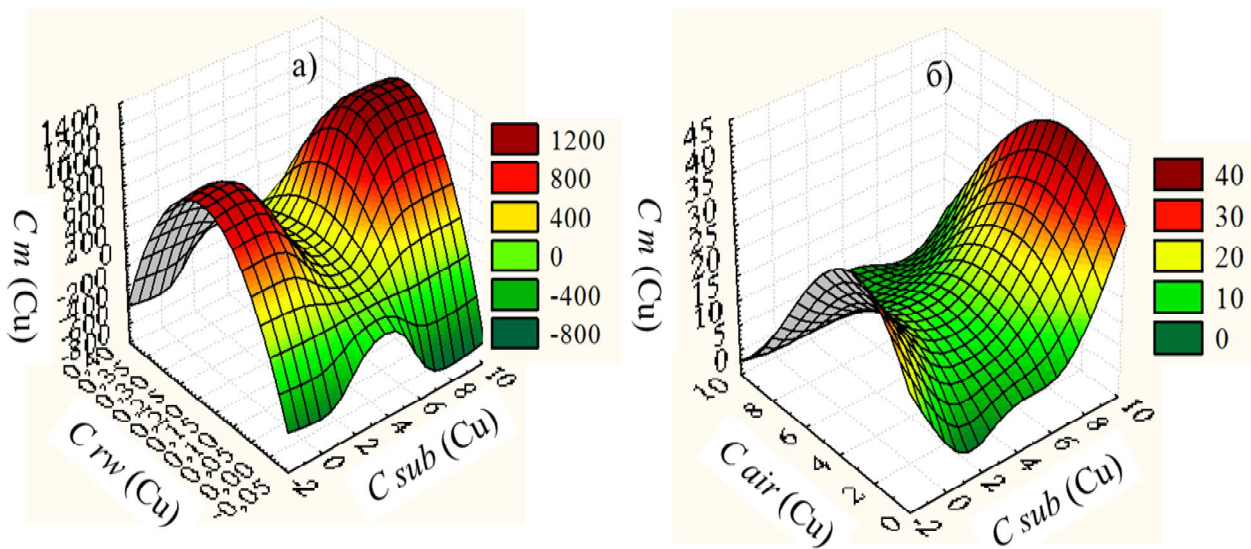


Рис. 2. Моделі 3D залежностей концентрацій Cu в міксоміцеті від концентрацій в субстраті та: а) дощовій воді, б) повітрі

Таблиця 7

**Результати регресійного аналізу для Mn**

Regression Summary for Dependent Variable: $C_m$ (Mn)								
$R=0,64$ $R^2=0,41$ $Adjusted\ R^2=0,36$ $F(2,21)=7,4113$ $p<0,004$								
Mn	Beta	BetaStEr	B	BStEr	t(21)	p-level	ParC	SParC
Inter	--	--	1798	767	2,35	0,03	--	--
$C_{air}$	0,62	0,18	42,91	12,41	3,46	0,002	0,60	0,58
$C_{SMF}$	-0,50	0,18	-214,5	76,55	-2,80	0,01	-0,52	-0,47

На вміст Ni в досліджених міксоміцетах в основному впливає лише його концентрація в ґрунті:

$$C_m(Ni) = 1,77 \cdot C_{soil} \tag{10}$$

Про коректність побудованої регресійної моделі свідчить відповідність закону розподілу залишків нормальному закону. В табл. 8 наведені результати регресійного аналізу для Ni.

Таблиця 8

**Результати регресійного аналізу для Ni**

Regression Summary for Dependent Variable: $C_m$ (Ni)						
$R=0,67$ $R^2=0,45$ $Adjusted\ R^2=0,43$ $F(1,23)=18,75$ $p<0,00025$						
Ni	Beta	BetaStEr	B	BStEr	t(23)	p-level
$C_{soil}$	0,67	0,15	1,77	0,41	4,33	0,0002

Концентрація Pb в досліджених зразках міксоміцетів пропорційно збільшується при зростанні вмісту цього елемента в дощовій воді та рухомих формах ґрунту і знаходиться у зворотній залежності від його концентрацій у валових формах ґрунту (табл. 9):

$$C_m(Pb) = 1758 \cdot C_{rw} + 8,09 \cdot C_{SMF} - 0,43 \cdot C_{soil} \tag{11}$$

Таблиця 9

**Результати регресійного аналізу для Pb**

Regression Summary for Dependent Variable: $C_m$ (Pb)								
$R=0,74$ $R^2=0,54$ $Adjusted\ R^2=0,48$ $F(3,21)=8,32$ $p<0,0008$								
Pb	Beta	BetaStEr	B	BStEr	t(21)	p-level	ParC	SParC
$C_{rw}$	1,21	0,34	1758	496,59	3,54	0,002	0,61	0,52
$C_{SMF}$	0,52	0,18	8,09	2,84	2,85	0,01	0,53	0,42
$C_{soil}$	-0,96	0,37	-0,43	0,16	-2,58	0,02	-0,49	-0,38

При цьому кожен із згаданих факторів відіграє самостійну роль у зміні концентрації в міксоміцетах і не підлягає значному впливу інших досліджених предикторів.

**Висновки та перспективи дослідження.** Математичне моделювання є перспективним засобом для прогнозування рівня техногенного забруднення навколишнього середовища токсичними елементами. З допомогою побудованих математичних моделей встановлено залежності біоаккумуляції міксоміцетами елементів від їх концентрацій у субстратах, ґрунті та його рухомих формах, повітрі та дощовій воді. В результаті дослідження зроблені наступні висновки:

1. Встановлено, що рівень Са у більшості з 52 проаналізованих зразків 28 видів міксоміцетів, пропорційно збільшується в залежності від концентрації цього елемента в ґрунті та пропорційно зменшується у відповідності до концентрації в повітрі, дощовій воді, рухомих формах ґрунту та субстратах.

2. Виявлено, що концентрація Mn в досліджених зразках міксоміцетів залежить від його вмісту у повітрі та рухомих формах ґрунту, Pb – в дощовій воді, ґрунті та його рухомих формах.

3. З'ясовано, що для As та Fe в досліджених міксоміцетах найкращими предикторами виявились субстрат та ґрунт, субстрат також відіграє вирішальну роль у зміні вмісту Al та Cd, а ґрунт вагомо впливає на концентрацію Ni в міксоміцетах.

4. Отримані моделі дозволяють визначати шляхи надходження токсичних елементів у біооб'єкти та прогнозувати довгострокові ефекти техногенного впливу на стан екологічної безпеки навколишнього середовища.

### Література

1 Кривомаз Т.І. Перший аналіз вмісту важких металів та інших елементів в плодкових тілах нівальних міксоміцетів Карпат / Т.І. Кривомаз, І.М. Андрусишина // Екологічна безпека та природокористування. – 2015. – № 4(20). – С. 20–31.

2 Кривомаз Т. І. Аналіз біотрансформації металів альпійськими нівальними міксоміцетами відносно їх субстратів / Т. І. Кривомаз, О. С. Волошкіна, А. Мішо, І. М. Андрусишина // Східно-Європейський журнал передових технологій – Харків, 2016. – № 5/10(83). – С. 50–57.

3 Кривомаз Т. І. Моделювання забруднення навколишнього середовища металами в залежності від їх концентрації в міксоміцеті *Fuligo septica* / Т. І. Кривомаз, Д. В. Максименко // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування» – Івано-Франківськ, 2016. – №2(14) – С. 87–92.

4 Халафян А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных изд.3 / А.А. Халафян // Бином-Пресс. – 2007. – 512 с.

5 Kryvomaz T. The assessment of heavy metal accumulation by myxomycetes / T. Kryvomaz // Motrol. – Lublin, 2015. –Vol.17, № 8. – P.157-164

6 Poulain M. Les Myxomycètes / M. Poulain, M. Meyer, J. Bozonnet. – Sevrier: Federation mycologique et botanique Dauphiné-Savoie, 2011. – 556 p.

7 Setälä A. High metal contents found in *Fuligo septica* L. Wiggers and some other slime molds (Myxomycetes) / A. Setälä, P. Nuorteva // Karstenia. – 1989. – V. 29. – N 1. – P. 37-44.

9 Stijve T. Accumulation of various metals by *Fuligo septica* (L.) Wiggers and by some other slime molds (myxomycetes) / T. Stijve, D. Andrey // Australasian Mycologist. –1999. – V. 18. – N 2. – P. 23–26.

10 Tüzen M. Determination of heavy metals in soil, mushroom and plant samples by atomic absorption spectrometry / M. Tüzen // Microchem J. – 2003. – N 74. – P. 289–297.

11 Zhulidov D. A. Zinc accumulation by the slime mold *Fuligo septica* (L.) Wiggers in the former Soviet Union and North Korea / D. A. Zhulidov, R. D. Robarts, A. V. Zhulidov, O. V. Zhulidova, D. A. Markelov, V. A. Rusanov, J. V. Headley // Journal of Environmental Quality. – 2002. – № 31. – P. 1038–1042.

© Т. І. Кривомаз,  
О. С. Волошкіна,  
Д. В. Максименко,  
О. Г. Жукова

Надійшла до редакції 03 березня 2017 р.  
Рекомендував до друку  
докт. техн. наук Я. О. Адаменко