

15 Воробйов С. Г., Кудленко В. Г. Определения удельной гамма-активности пород шахтных отвалов // Вісн.КДПУ ім. Михайла Остроградського. Кременчук, 2008. Вип. 6(53). Част. 1. С. 120–123.

16 Выборов С. Г., Проскурня Ю. А., Силин А. А. Экологические последствия структурно-вещественных преобразований отвальных пород терриконов // Наук. праці ДонНТУ: Сер. «Гірн.-геолог.». 2010. Вип. 11(161). С. 155–160.

17 Дворянова И. Н., Шафоростова М. Н. Эколого-экономическое обоснование использования породы из отвалов // Збірка допов. VI рег. конфер. «Комплексне використання природних ресурсів». Донецьк. 2013. С. 24–25.

18 Зборщик М. П., Осокин В. В. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений. Донецк, 1996. – 178 с.

19 Коваленко Л. И., Омельченко Н. П. Перспективы использования горелых пород шахтных отвалов // Проблеми екології. 2009. № 1-2. С. 16–19.

20 Коваленко Л. И., Омельченко Н. П. Перспективы использования горелых пород шахтных отвалов. С. 18.

21 Семирягин С. В., Пилипенко Б. Н. Использование отходов угледобычи при производстве огнеупоров // Гірничий вісник. Кривий Ріг. 2014. Вип. 97. С. 244–247.

22 Уханева М. И., Хоботова Э. Б. Изучение возможности применения отходов угледобычи в производстве строительных материалов // Проблеми екології. 2009. № 1-2. С. 20–27.

23 Там само.

24 Физико-химическое моделирование процесса выщелачивания нефелина под действием кислых атмосферных осадков / С. И. Мазухина и др. // Геоэкология. 1997. № 5. С. 96–101.

25 Филиппова Я. В., Ефимов В. Г. Применение перегоревших пород шахты им. Калинина для строительства дорожного полотна // Збірн. наук. праць «Екологічні проблеми паливно-енергетичного комплексу». Донецьк. 2013. С. 71–74.

© О. І. Повзун,  
С. В. Подкопаєв,  
В. І. Каменець

*Надійшла до редакції 13 лютого 2017 р.  
Рекомендував до друку  
докт. техн. наук Л. І. Челядин*

УДК 66.021+66.048.3

*Є. Ю. Черниш, Л. Д. Пляцук, О. М. Яхненко  
Сумський державний університет*

## **РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ МІГРАЦІЇ ТА БІОХІМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ КОМПОНЕНТІВ ФОСФОГІПСУ В ГРУНТОВОМУ ПРОФІЛІ**

У роботі розглянуто особливості впливу ґрунтової біоти на процес перетворення та фіксації важких металів у ґрунтовому комплексі. Розроблено модуль лабораторно-експериментального комплексу і відповідну методика дослідження впливу фосфогіпсу та композитних матеріалів на його основі, щодо процесу вертикальної міграції фільтраційного розчину за профілем ґрунту для здійснення моделювання кінетики розподілу компонентів фосфогіпсу в ґрунтовому профілі. Визначено основні показники їх біохімічної конверсії та трансформації у ґрунтового комплексу з урахуванням біотичної компоненти.

**Ключові слова:** модель, важкі метали, міграція, ґрунтовий профіль, фосфогіпс, біотична компонента

В работе рассмотрены особенности влияния почвенной биоты на процесс превращения и фиксации тяжелых металлов в почвенном комплексе. Разработан модуль лабораторно-экспериментального комплекса и соответствующая методика исследования влияния фосфогипса и композитных материалов на его основе на процесс вертикальной миграции

фільтраційного розчину по профілю ґрунту для здійснення моделювання кінетики розподілу компонентів фосфогіпсу по профілю ґрунту. Визначені основні показники їх біохімічної конверсії та трансформації в ґрунтового комплексі з урахуванням біотичної компоненти.

**Ключові слова:** модель, важкі метали, міграція, ґрунтовий профіль, фосфогіпс, біотична компонента

The paper focused on analyzes of the influence of soil biota on the process of conversion and fixation of the heavy metals in the soil complex. The module laboratory-pilot complex was designed. The methodology of investigating the influence of phosphogypsum and composite materials based on it on the process of vertical migration of the filtration solution on the soil profile was developed for modeling the distribution kinetics components of phosphogypsum in the soil profile. The main parameters of their biochemical conversion and transformation in the soil complex were determined, taking into account the biotic components.

**Keywords:** model, heavy metals, migration, soil profile, phosphogypsum, biotic component

**Актуальність теми.** Сформована практика утилізації фосфогіпсу призводить до віддаленого ефекту зосередженого забруднення території. Це небезпечно з точки зору подальшого надходження забруднень в ґрунти і води ландшафту. Терикони фосфогіпсу несприятливо впливають на прилеглі території через еолові процеси, зміну напрямку повітряних потоків, попадання в атмосферу сполук фтору, підкислення ґрунтів навколишніх екосистем дощовими стічними водами, через гідродинамічний вплив на територію, зміну напрямків міграційних потоків в ґрунтах, можливе забруднення прилеглих територій елементами-домішками, звичайно різко погіршується привабливість території для проживання.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Більшість моніторингових робіт шламонакопичувачів, і фосфогіпсу в тому числі, є вузькими спеціалізованими дослідженнями. Метою моніторингу відвалів може бути: встановлення зміни гранулометричного та хімічного складу свіжого фосфогіпсу і фосфогіпсу, що зберігався певний час у відвалі, для визначення можливості і технологічних прийомів його переробки в корисні продукти [4], оцінка якості фосфогіпсу як можливого субстрату для вирощування рослин і з'ясування, чи не має фосфогіпс, що може містити різні домішки, і в тому числі, домішки стронцію, які мігрують і в ґрунт і в рослини, токсичного впливу для подальшої можливості використання фосфогіпсу в складі складних компостів [5], а також такі дослідження можуть бути спрямовані на вивчення умов формування техногенних порід у відвалах при забезпеченні їх стійкості для побудови гідрогеомеханічних моделей відвалів, проведення розрахунків і обґрунтування параметрів стійкості відвалів фосфогіпсу для забезпечення промислової та екологічної безпеки відвальних робіт. [6]

На базі СумДУ впродовж 11 років проводився моніторинг фосфогіпсових відвалів і прилеглих територій ВАТ «Сумхімпром» для виявлення складу фосфогіпсу різних періодів складування, зміни його хімічного і фізичного стану, стану забруднення ґрунтів елементами - домішками, що містяться в фосфогіпсі, і в першу чергу такими важкими металами, як свинець та кадмій, домішки яких надходять з природної сировини при переробці фосфоритів. За результатами моніторингу виявлено, що підвищення валового вмісту, концентрації рухомої форми свинцю і кадмію в зоні впливу відвалів фосфогіпсу, не досягло критичних значень і не перевищує ГДК, хоча є вище фонові для цього регіону [7]. Однак це є негативною тенденцією, яка в майбутньому може призвести до небажаних наслідків, оскільки буферні і акумулюючі здатності ґрунту не є безмежними. При перевищенні порогів стійкості ґрунтових систем відбудеться забруднення важкими металами поверхневих і підземних вод, рослинницька продукція стане непридатною для споживання, що призведе до зниження показників здоров'я та якості життя населення.

Складний багатофакторний вплив на ґрунтовий розчин ускладнює визначення середніх концентрацій елементів. Про це свідчать результати визначення вмісту важких

металів у природних ґрунтових розчинах з прилеглих до відвалу територій. Встановлено, наприклад, що під впливом атмосферних опадів, випаровування і транспірації рослинних угруповань динаміка зміни концентрації мікроелементів в ґрунтових розчинах може змінюватися більш, ніж на порядок. В аналогічних умовах концентрація головних іонів макроелементів ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  і  $\text{PO}_4^{3-}$ ) змінюється в меншій степені. Відповідно, на сьогодні, все більшого значення набуває проблематика визначення закономірностей міграції та акумуляції, як біогенних елементів, так і полютантів, що надходять із фосфогіпсу в ґрунтовий профіль. Такі дослідження потребують лабораторного моделювання цих процесів з урахуванням біохімічних та фізико-хімічних особливостей протікання процесів гуміфікації та мінералізації у ґрунтовому комплексі.

**Об'єкт, мета та завдання дослідження.** Об'єкт дослідження – процес міграції та біохімічних перетворень компонентів фосфогіпсу у ґрунтовому профілі.

Метою дослідження є розробка лабораторно-експериментального комплексу з моделювання процесу міграції та біохімічної конверсії компонентів фосфогіпсу в ґрунтовому профілі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- теоретична формалізація впливу біотичної компоненти ґрунту на трансформацію біогенних сполук і важких металів в ґрунтовому профілі;
- дослідження роботи існуючих ґрунтово-агрохімічних лізиметричних установок;
- розробка лабораторної експериментальної моделі процесу міграції та біохімічної конверсії компонентів фосфогіпсу в ґрунтовому профілі;
- розробка методичних засад функціонування лабораторно-експериментального комплексу.

**Аналітичні дослідження та теоретична формалізація впливу біотичної компоненти ґрунту на трансформацію біогенних сполук і важких металів в ґрунтовому профілі.** Присутність у ґрунтових екосистемах різних біотичних компонентів, які відрізняються за біохімічною специфічністю, обумовлює різноманітність процесів, що відбуваються у ґрунті. Ґрунтові мікроорганізми трансформують органічні рештки, беруть участь у формуванні структури ґрунту, утворенні гумусу, його мінералізації, у поповненні екосистем мінеральним азотом, у мобілізації фосфору з органічних та важкорозчинних неорганічних сполук, у переведенні речовин з нерозчинного стану в розчинний і навпаки, сприяють чи перешкоджають міграції елементів по ґрунтовому профілю [1].

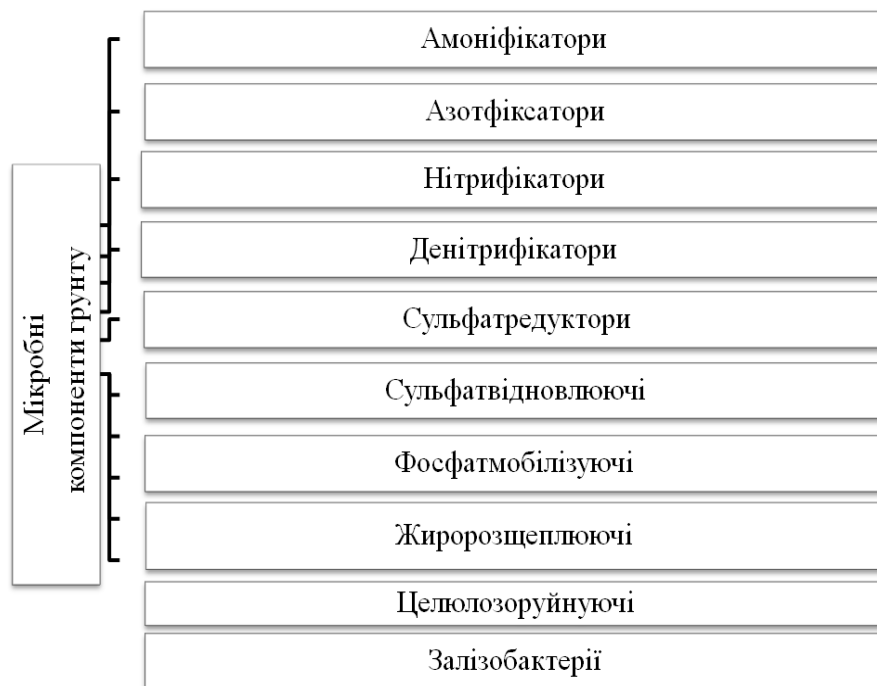
Ґрунтовій біологічній складовій властива надзвичайно висока різноманітність видового складу. Характер біотрансформацій речовин у ґрунтах залежать від кількісного складу і співвідношення груп представників біоти ґрунту, від кількості і якості органічних решток, водно-повітряного режиму, температури, кислотності, окисно-відновних умов тощо.

В залежності від субстрату, який використовується мікробіотичним компонентом, можна виділити найпоширеніші серед них в ґрунтовому комплексі (рис.1).

Потрапляння компонентів фосфогіпсу до ґрунту може по різному впливати на ґрунтові процеси, в тому числі і біотичні, в залежності від того, в який за генезисом ґрунт, в якій кількості вноситься і які домішки містить фосфогіпс. Так, фосфогіпс збільшує швидкість всмоктування води ґрунтом на 30-35% і покращує водопостачання рослин і ґрунтових організмів. Внесення фосфогіпсу може впливати на якісний склад гумусу: при його додаванні в нейтральних умовах в орному шарі чорноземів збільшується частка гумінових кислот, що зв'язуються з кальцієм фосфогіпсу з утворенням органо-мінеральних важкорозчинних в воді сполук.

Фосфор у ґрунті міститься як в органічній формі (фітин, гліцерофосфат, залишки нуклеїнових кислот тощо), так і у вигляді важкорозчинних неорганічних сполук. В органічній частині ґрунту вміст фосфору, в перерахунку на  $\text{P}_2\text{O}_5$ , майже в 10 разів більший, ніж у кристалічних гірських породах. Органічні сполуки фосфору здатні розкладати бактерії родів *Bacillus*, *Pseudomonas*, мікроміцети родів *Aspergillus*, *Penicillium*,

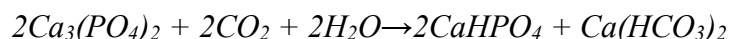
*Rhizopus*, *Trichotecium*, *Alternaria*, дріжджі *Rhodotorula*, *Saccharomyces*, *Candida*, *Hansenula*, завдяки їх здатності синтезувати фосфатази.



**Рис. 1. Найпоширеніші в едафотопі групи мікроорганізмів**

Найбільш розчинними є фосфати натрію і калію, а також кислі фосфати кальцію та магнію. На сильнокислих ґрунтах фосфор закріплюється ферумом і алюмінієм, а на карбонатних – кальцієм і магнієм. Мобілізувати фосфор з важкорозчинних сполук заліза, алюмінію і кальцію здатні мікроорганізми родів *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Enterobacter*, *Bacterium*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Burkholderia*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhodotorula*, сульфатвідновнювальні бактерії роду *Desulfobacterium*, везикулярно-арбускулярні мікоризні гриби *Trichoderma* та інші [12].

Фосфати ґрунту можуть розчинятися різними кислотами, в тому числі вуглекислою, що утворюється в результаті корневих виділень рослин:



Мобілізація фосфатів відбувається і в результаті утворення мікроорганізмами різних органічних кислот, кетокислот при бродінні або неповному окисненні вуглеводів. Фосфати перетворюються на розчинні форми і в результаті діяльності нітрифікуючих бактерій, які утворюють азотну кислоту, та бактерій, які окислюють сірку.

Фосфогіпс має кислий рН, тому позитивний ефект від його застосування як джерела кальцію і посилення біологічної активності буде проявлятися, в першу чергу, на лужних і засолених ґрунтах, де катіон кальцію буде витіснити поглинений ґрунтовим комплексом натрій або калій, сприятиме структуруванню ґрунту, підсиленню родючості. Так, кальцій покращує структуру ґрунту, впливає на кислотність середовища, рухливість інших елементів живлення. Кальцій зменшує негативний вплив на рослини феруму, алюмінію і марганцю, переводячи їх у нерозчинні форми, сприяє кращій фіксації азоту з атмосфери азотфіксаторами, мінералізації органічних сполук і вивільненню поживних речовин (N, P, K). В той же час на кислих ґрунтах фосфогіпс буде сприяти ще більшому підкисленню середовища за рахунок вмісту сполук залишкового фтору або фосфору, що посилюватиме міграцію більшості важких металів.

Перерозподіл і міграція важких металів по профілю ґрунту відбувається нерівномірно в залежності від вмісту органічної речовини, мінерального складу ґрунту,

гранулометричного складу, типу водного режиму, реакції середовища ґрунтового розчину, температури ґрунтових горизонтів, наявності та видового складу мікроорганізмів.

У фонових ґрунтах зазвичай зустрічається всього п'ять основних носіїв важких металів: глинисті мінерали, (гідр)оксиди Fe і Mn, сірка та органічна речовина.

Високий вміст гумусу, вільних оксидів заліза чи інших речовин, які є основними носіями важких металів, переважання гумінових кислот в складі гумусу, близька до нейтральної реакція ґрунту, важкий гранулометричний склад забезпечують доволі міцну фіксацію елементів металів і їх відносну нерухомість у ґрунтовому профілі. Важкі метали в залежності від їх вмісту у ґрунті виступають або як каталізатори, або як інгібітори ґрунтових біохімічних процесів.

Роль бактерій в міграції важких металів різна. Певні групи мікроорганізмів беруть участь в редукції сульфатів до сульфідів, що приведе до осадження металів в "сильно" відновлювальних умовах. Інші, наприклад, *Thiobacillus thiooxidans*, – окислюють сульфід металів в аеробному середовищі, сприяючи підкисленню, вивільненню і міграції металів, особливо в кислих дренажних водах. [13].

Оксиди і гідроксиди заліза є мінералами, що достатньо активні по відношенню до ряду важких катіоногенних металів, які сорбуються на поверхні частинок (гідр)оксидів заліза. Бактеріальна редукція гідроксидів заліза збільшує рухливість асоційованих з ними важких металів.

Відомі групи бактерій, що викликають дисиміляційне відновлення заліза, загальна їх ознака - здатність окислювати органічну речовину спряжено з відновленням  $Fe^{3+}$ . Крім заліза, ці бактерії переводять в осад метали зі змінною валентністю, використовуючи окиснені метали як акцептори електронів [8].

Внесення фосфогіпсу в залежності від його складу та рН може сприяти збільшенню кількості важких металів в складі ґрунту, або збільшенню можливості їх міграції в результаті підкислення середовища (табл. 1) [9].

Ризосферні мікроорганізми є першою ланкою живих структур, які починають взаємодіяти з катіонами та аніонами в ґрунті.

Таблиця 1

#### Рухомість хімічних мікроелементів в різних ґрунтах в залежності від їх реакції

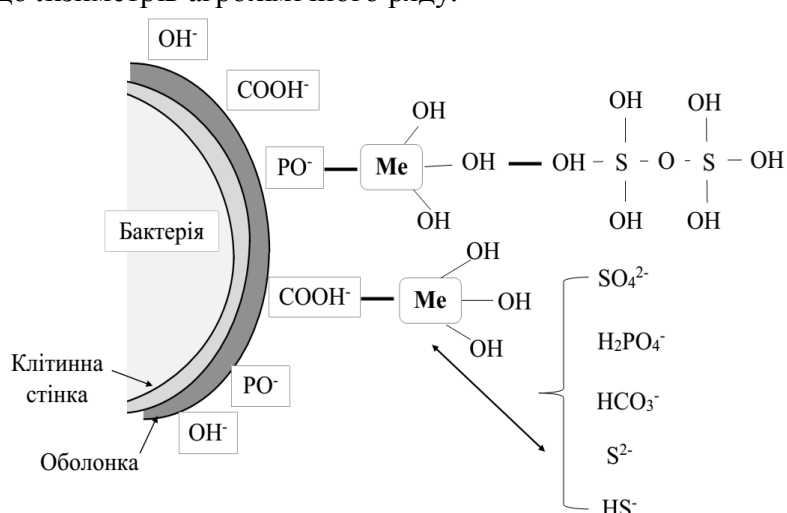
Тип ґрунту (в залежності від реакції середовища)	Ступінь рухомості елемента		
	Практично нерухомі	Слабкорухомі	Рухомі
Кислі, рН менше 5,5	$Mo^{+4}$	$Pb^{+2-4}$ , $Cr^{+3-6}$ , $Ni^{+2-3}$ , $V^{+4-5}$ , $As^{+3}$ , $S^{+e3}$ , $Co^{+2-3}$	Sr, Ba, Cu, Zn, Cd, Hg
Слабкокислі та нейтральні, рН=5,5-7,5	Pb	Sr, Ba, Cu, Cd, Hg, $Cr^{+3-6}$ , $Ni^{+2-3}$ , $Co^{+2-3}$ , $Mo^{+4}$	Zn, $V^{+5}$ , $As^{+5}$ , $S^{+6}$
Лужні та сильнолужні, рН=7,5-9,5	Pb, Ba, Co	Zn, Ag, Sr, Cu, Cd	$Mo^{+6}$ , $V^{+5}$ , $As^{+5}$

Відповідно на рис. 2 нами здійснено формалізацію процесу бактеріальної мінералізації із біохімічним вилученням металів із екосистеми.

Катіони більшості металів можуть реагувати з розчиненими аніонами, такими як сульфат, фосфат, сульфід і бікарбонат. Залежно від доступних аніонів, на бактеріальній поверхні можуть утворюватися різні мінерали. В процесі метаболічно-індукованої біомінералізації утворюються вторинні мінерали в якості побічних продуктів метаболізму бактерій, що можуть містити хімічно зв'язану форму металу, сприяючи вилученню останніх із активного масообмінного потоку в екосистемі

**Дослідження роботи існуючих ґрунтово-агрохімічних лізиметричних установок.** Секційні лізиметри, що дозволяють досліджувати неоднорідність гравітаційного перенесення вологи в ґрунтах, можливість надходження забруднюючих і поживних речовин у ґрунті води, оцінити масоперенос, визначити гідрохімічні

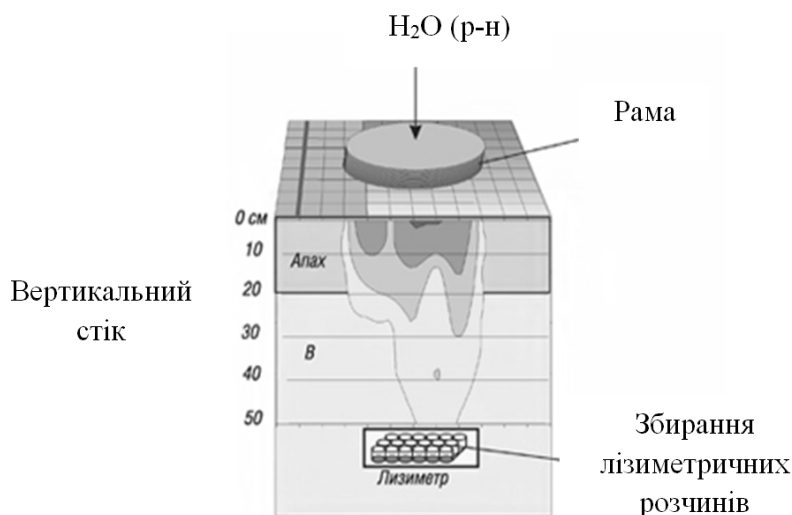
параметри руху речовин в ґрунтах. Вони за своїми характеристиками ближче всього розташовуються до лізиметрів агрохімічного ряду.



**Рис. 2. Схематичне зображення процесу бактеріальної мінералізації із зв'язуванням та осадженням металів у складі мінералів**

Однак принциповою відмінністю є те, що в експериментах із застосуванням секційних лізиметрів моделюється ситуація надходження на поверхню ґрунту забруднюючих або поживних речовин (рис. 3).

Лізиметри представляють собою пластикові підноси, розділені на сектори. Кожен сектор має отвір, в який вставлена силіконова трубка. Під лізиметром на дні ніші встановлюється підніс з тарованими пластиковими стаканчиками (флаконами) для збору вологи, що фільтрується. Всі сектори і стаканчики нумеруються, на дно кожного сектора необхідно покласти кружок фільтрувального паперу, щоб уникнути закупорки трубок.



**Рис. 3. Вбудовані секційні лізиметри [10]**

Ґрунтова волога, яка потрапляє в сектор лізиметра, через трубку надходить в пластикові флакони. Фіксується час і обсяги лізиметричних вод для розрахунку інтенсивності вертикального стоку окремо в кожному секторі. При постановці фільтраційного експерименту з використанням речовин-міток, можливий порційний збір вологи в сектори лізиметра для отримання інформації про явища виносу і просочування розчинених речовин за характером зростання концентрацій. Подібні дані, але одержані в лабораторних умовах на ґрунтових колонках, широко використовуються в математичних моделях перенесення вологи і речовин.

При підготовці лізиметричних установок до роботи після вибору майданчика, закладення розрізу і визначення глибини установки лізиметра слід дотримуватися наступних рекомендацій і послідовності роботи [10].

1. Підготовка майданчика – зачищення, вирівнювання і препарування поверхні, щоб уникнути закупорки пор ґрунту.

2. Встановлення рам. Є зручним використанням рам площею не менше 600 см<sup>2</sup>. Їх слід обережно врізати в ґрунт на глибину 2-3 см з метою збереження структури ґрунтового покриву. Рекомендується встановлювати з урахуванням горизонтального розтікання поливної води на відстані не менше 20-30 см від краю розрізу (траншеї). Рами слід встановлювати на поверхню ґрунту до споруди ніші для лізиметра з двох причин: по-перше, щоб уникнути додаткового висушування ґрунтової товщі, тому що збільшується випаровування з поверхні, по-друге, щоб уникнути обвалу досліджуваного профілю при додатковому тиску під час установки рами. Під час підготовки ніші поверхня ґрунту і рами вкривається поліетиленовою плівкою для зниження випаровування, а зверху, щоб не збільшувалася температура ґрунту, накривають скошеною травою або сіном.

3. Спорудження і підготовка ніші для установки лізиметрів. Її розмір повинен відповідати розміру лізиметра. Верхня стінка (стеля) повинна бути строго горизонтальна, щоб уникнути стікання вологи по площині нахилу і відпрепарована, тому що тільки зрізання ґрунту призводить до змазування і закупорки ґрунтових пор.

4. Установка лізиметра до стелі ніші повинна бути дуже щільною. В такому випадку вони виконують подвійну функцію: збір фільтраційних вод строго з площі, чітко окресленої окремим сектором лізиметра, і механічна підтримка ґрунтової товщі, що змочується. Тому врізаний в стелю ніші лізиметр необхідно зміцнити дошками або фанерою для забезпечення його стійкості.

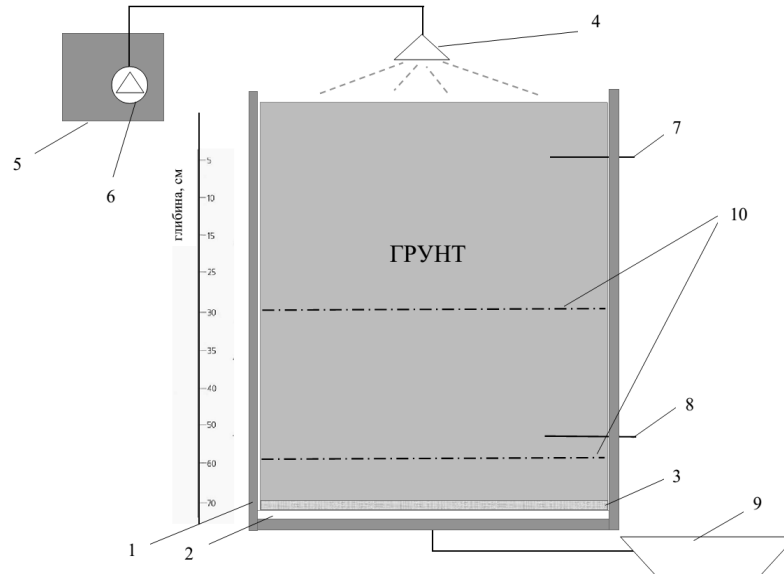
5. Фільтрація води і розчину. В рами подається вода або розчин, при необхідності підтримується певний рівень (1-5 см). Збір фільтраційних вод проводиться до повного припинення фільтрації, іноді лізиметри залишаються на ніч. Можливе розкриття ґрунтової товщі над лізиметрами з метою дослідження особливостей властивостей ґрунту і перенесення і сорбції речовин.

Таким чином, розглянуті ґрунтово-агрохімічні лізиметри різних конструкцій, засновані на принципі вільного стоку гравітаційної вологи. Недоліком цих лізиметричних установок є те, що неможливо використовувати їх для точних балансових досліджень (за винятком зважуваних лізиметрів) перенесення вологи і речовин. Цього недоліку позбавлені лізиметри для водно-балансових досліджень.

**Розробка лабораторної експериментальної моделі процесу міграції та біохімічної конверсії компонентів фосфогіпсу в ґрунтовому профілі.** На рис. 4 представлений розроблений лабораторно-експериментальний комплекс, який складається з модуля ґрунтового зрізу – камера з оргскла, габарити: довжина×ширина×висота: 60 см×50 см×70 см.

При цьому на глибинах 30 см і 60 см відбираються проби фільтрату за допомогою спеціальних піддонів, в дні яких є окремі осередки для збору води, - лізиметри. Ці піддони витягуються з модуля з ґрунтом і визначається кількість розчину, що профільтрувався (лізиметричний розчин) і концентрація в ньому основних біогенних речовин (фосфатів, сульфатів) і важких металів, а також значення рН.

**Методика проведення дослідження процесів біохімічної трансформації компонентів фосфогіпсу та композитних матеріалів на основі фосфогіпсу.** Послідовність відбору ґрунту поблизу відвалу така: вибирається прямокутна ділянка ґрунту, яка має площу 2 500 см<sup>2</sup>, або квадрат із стороною 50×50 см. Уздовж однієї сторони викопується яма та робиться зріз вертикальною площиною вздовж сторони. Висота такої стінки до 70 см, тобто до горизонту материнської породи. Слід зауважити, що як показали попередні польові дослідження, на глибині понад 30 см рівень забруднення наближається до фонового, що зумовлено повільною міграцією важких металів із тіла масиву відвалу.



**Рис. 4. Лабораторно-експериментальний комплекс:** 1 - камера з оргскла; 2 – днище камери з піддоном; 3 – пориста пластина / перфоровані трубки; 4 – спринклер; 5 – ємність з водою; 6 – насос для подачі води в модуль ґрунтового розрізу; 7, 8 – датчики температури; 9 – ємність для відбору фільтрату; 10 – вбудовані секційні лізиметри

Камера модулю з ґрунтовим зрізом заповнюється ґрунтом, який просіяний через сито  $\varnothing$  5 мм, зберігаючи притаманний профіль ґрунту (виходячи з генетичних ґрунтових горизонтів місцевості, де розташований фосфогіпсовий відвал).

На поверхні ґрунту, не доводячи до країв рами, наносять шар дигідратного фосфогіпсу з вологістю не менше 45%, товщиною 10 мм або біогенний композит на його основі.

Для проведення досліду по промивці ґрунту необхідно наситити ґрунт вологою. На зволоження ґрунту використовується 570-600 мл води (в кожному колонку). Для промивки (через 2 години після зволоження) беремо по 270 мл води. Воду розраховуємо по кількості опадів за місяць, в Сумській області кількість опадів за рік складає 603 мм/рік. Середньомісячна кількість опадів приблизно дорівнює 50 мм/місяць. Комплекс функціонує в мезофільному режимі – 20°C (температура у приміщенні лабораторії). Початковий гідравлічний час утримання становив 30 діб.

Відбір ґрунтових зразків, підготовка до аналізу та визначення валових, кислоторозчинних і рухомих форм ВМ проводиться згідно із загальноприйнятою методикою [2].

Аналіз зразків ґрунту на кислотність проводяться шляхом вимірювання показника рН розчину у витяжці 1н КСІ потенціометричним методом.

Лізиметричні розчини відбираються на 30 добу при візуальному спостереженні для фіксації напрямків вертикальної міграції фільтраційного розчину за профілем ґрунту. Далі виходячи з параметрів контролю процесу визначають необхідність продовження часу експерименту.

У ґрунтовому розчині важкі метали знаходяться в з'єднанні з різними присутніми там іонами. Концентрація важких металів у ґрунтовому розчині схильна до різких коливань в залежності від властивостей ґрунту. Найбільший вплив на зміну концентрації елементів роблять наступні фактори:

- 1) тривалість;
- 3) біологічна активність ґрунту;
- 4) надмірна волога;
- 5) гетерогенність твердої фракції ґрунту та біокомпозиту на основі фосфогіпсу.



Крім того, для оцінки кінетики виділення біогенних речовин з композитних матеріалів на основі фосфогіпсу здійснювали вилуговування біологічно активних компонентів із їх зразків при температурі 20°C. Наважку гранульованого композитного матеріалу одного розміру (діаметр 4-5 мм), що містять солі міді, заліза, цинку і т.д., клали у скляну посудину та заливали дистильованою водою (співвідношення т.ф.:р.ф. = 1/5) і здійснювали перемішування протягом 5 хвилин. Потім тверду та рідку фазу розділяли центрифугуванням та фільтруванням. У відділеному фільтраті рентгенфлуорисцентним методом вимірювали вміст металів.

**Методика визначення приросту бактеріального матриксу, що відповідає біохімічній активності фосфогіпсу та композитів на його основі.** Для проведення комплексного еколого-біохімічного дослідження було здійснено об'єднання існуючих методик мікробіологічних досліджень [3,11] та адаптовано їх до завдань, що були поставлені в роботі. Крім того, було розроблено спеціальне поживне середовище, що містить дигідратний фосфогіпс та відповідні рекомендації його застосування [14].

Етапи проведення визначення:

1) На поверхню готових середовищ у чашки Петрі додавали 1 г зразка фосфогіпсу чи композиту на його основі.

2) Інкубацію й підрахунок колоній, що утворювалися, проводили, враховуючи, що кожна колонія – результат розмноження однієї життєздатної клітини мікроорганізму.

При цьому з кожного розведення робили посів на набір чашок із щільним поживним середовищем (метод паралельних висівів).

3) При значному збільшенні кількість колоній для зручності використовували сітку, нанесену на задню поверхню чашки, яка складається із квадратів 0,5 см × 0,5 см, і підраховували колонії в одному квадраті й множили їх на 20 або 80, в залежності від кількості квадратів і щільності покриття колоніями поверхні. Для автоматизації процесу підрахунку використовували спеціальне програмне забезпечення за допомогою цифрової системи виведення зображення «SEO Scan ICX 285 AK-F IEE-1394» і морфометричної програми «SEO Image Lab 2.0» (Суми, Україна).

При врахуванні результатів визначали середню кількість колоній, що виростили при посіві кожного розведення. Для одержання достовірних результатів відбирали чашки, де число колоній бактерій перебувало в межах від 30 до 300.

Якщо чашки із двох послідовних розведень потрапляють у цю область, кількість колонієутворюючих одиниць (КУО) в 1 мл розраховують як їхнє середнє значення.

4) Розраховують середню кількість КУО (N) в 1 мл за формулою:

$$N = \frac{c}{(n_1 + 0,1 \times n_2) \times d}, \quad (1)$$

де  $c$  – сума підрахованих колоній на всіх чашках;  $n_1$  – кількість чашок першого розведення;  $n_2$  – кількість чашок другого розведення;  $d$  – коефіцієнт першого розведення; 0,1 – коефіцієнт, що враховує кратність першого й другого розведення.

При цьому отриманий результат співвідносили з масовою вагою гранул фосфогіпсу. Чашки Петрі зі зразками витримували в термостаті ТГУ-01-200 упродовж тижня для підтримання мезофільного температурного режиму (309 К). Дослідження форми та клітинної структури виконується на трансмісійному електронному мікроскопі ЕМВ 100АК (НВО «Електрон», Суми, Україна). Додатково можна здійснити дослідження на сканувальному електронному мікроскопі РЕММА102 (ВАТ «СЕЛІМІ», Суми, Україна). Контроль рН проводиться за допомогою рХ-метр рХ-150 (іонометр) (Білорусь) з електродом скляним комбінованим «ЭКС-10603».

**Висновки.** Здійснено теоретичну формалізацію впливу біотичної компоненти на процес перетворення та фіксації важких металів у ґрунтовому комплексі.

Для регулювання впливу різних рівнів фізико-хімічних факторів при визначенні основних закономірностей впливу фосфогіпсу та композитних матеріалів на його основі

на процес міграції біогенних елементів та важких металів було розроблено модуль лабораторно-експериментального комплексу та відповідна методика дослідження.

Розроблена лабораторна експериментальна модель дозволить дослідити процес вертикальної міграції фільтраційного розчину за профілем ґрунту, вплив фосфогіпсу на поверхні ґрунту на склад ґрунтового фільтрату, розподіл елементів в межах ґрунтової товщі та його вплив на стан ґрунтових мікроорганізмів, здійснити математичне моделювання кінетики розподілу компонентів фосфогіпсу за ґрунтовым профілем і визначити основні біохімічні показники їх трансформації у ґрунтового комплексі з урахуванням біотичної компоненти.

### Література

- 1 Курдиш І. К. Роль мікроорганізмів у відтворенні родючості ґрунтів / І. К. Курдиш // Сільськогосподарська мікробіологія: міжвід. темат. наук. зб. – 2009. – Вип. 9. – С. 7–32.
- 2 Лісовал А. П. Методи агрохімічних досліджень / А. П. Лісовал. – К., 2001. – 247с.
- 3 Сергійчук М. Г. Будова бактеріальної клітини та методи її дослідження / М. Г. Сергійчук. – К.: Фітосоціоцентр, 2001. – 232 с.
- 4 Мониторинговые исследования физико-химических свойств лежалого фосфогипса ТОО «Казфосфат» / М. М. Напенова, А. Б. Асенова, А. Б. Каржаубаева [та ін.] // VII Международная студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум», 2015
- 5 Петренко Д. В. Влияние производства фосфорных удобрений на содержание стронция в ландшафтах: автореферат дис. ... канд. біол. наук спеціальністю 03.02.08 / Д. В. Петренко. – Балашиха, 2014. – 15 с.
- 6 Лычева М. А. Особенности инженерно- геологических условий формирования отвалов фосфогипса / М. А. Лычева // Научный вестник Московского Государственного Горного Университета. – 2011. – №3 (12). – С.53–58.
- 7 Системный подход к экологическому мониторингу в районе размещения отвала фосфогипсовых отходов / Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, Е. Н. Яхненко [та ін.] // Экологический вестник. – Минск, 2015. – № 4 (34). – С. 77–85.
- 8 Водяницкий Ю. Н. Природные и техногенные соединения тяжелых металлов в почвах / Ю. Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2014. – № 4. – С. 420–432.
- 9 Трунова І. О. Исследование подвижности тяжелых металлов в ґрунтах ландшафтов в районе отвалов фосфогипса / І. О. Трунова, С. В. Вакал, Л. Д. Пляцук // Вісник Сумськ. держ. унів. Сер. Технічні науки. – 2004. – №2 (61). – С. 170–174.
- 10 Шеин А. Б. Особенности формирования элементов водного режима дерново-подзолистых почв в годовой, сезонной и суточной динамике / А. Б. Шеин, Е Умарова // Вестник Московского университета. Сер. 17, Почвоведение. – 2002. – N 3. – С. 22–29.
- 11 МУ 2293-81 Методические указания по санитарно-микробиологическому исследованию почвы, М., 1981.
- 12 Rudresh D. L. Tricalcium phosphate solubilising abilities of Trichoderma ssp. in relation to Puptake and growth and yield parameters of chickpea (Cicer arietinum L.) / D. L. Rudresh, M. K. Shivaprakash, R. D. Prasad // Can. J. Microbiol. – 2005. – № 51. – P. 217–222.
- 13 Zincsulfur and cadmiumsulfur association in metalliferous peats: evidence from spectroscopy, distribution coefficients, and phytoavailability / С. E. Martinez, M. B. McBride, M. T. Kandianis etc. // Environ. Sci. Technol. – 2002. – V. 36. – P. 3683–3689.
- 14 Chernish E. The sewage sludge detoxification under bio-sulfidogenic condition / E. Chernish // Наука и образование Южного Казахстана. – Шымкент : Издательство ЮКУ, 2012. – № 3/4 (94/95). – С. 205–210.

© Є. Ю. Черниш,  
Л. Д. Пляцук,  
О. М. Яхненко

*Надійшла до редакції 10 травня 2017 р.  
Рекомендував до друку  
докт. техн. наук Л. І. Челядин*