

Екологія та охорона навколишнього середовища

УДК 631.423.3

І. В. Вагнер
аспірант*В. І. Чорна
д. б. н.

Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет

ВМІСТ РУХОМИХ ФОРМ БОРУ У ТЕХНОГЕННО-ПОРУШЕНИХ ҐРУНТАХ НІКОПОЛЬСЬКОГО МАРГАНЦЕВО-РУДНОГО БАСЕЙНУ

З'ясовані особливості розподілу концентрацій рухомого бору у просторі та по шарах педозему (насипний шар чорнозему південного на лесоподібних суглинках) і дерново-літогенних ґрунтів на сіро-зелених, червоно-бурих глинах та лесоподібних суглинках Нікопольського марганцеворудного басейну. Надано загальну оцінку стану техноземів за вмістом рухомого бору. Побудовані математичні моделі розповсюдження бору у просторі та дендрограми для оцінки його однорідності у шарах 0–10 ... 90–100 см кожного типу ґрунтів. Встановлено, що профілі досліджуваних ґрунтів неоднорідні. Техногенно-порушені ґрунти мають дуже високу концентрацію бору, що перевищує у 2–3 рази його вміст в еталонних зразках і у подальшому може призвести до борного засолення. Встановлено, що важливу роль у міграції бору грає муліста фракція та глинистий склад ґрунтів.

Ключові слова: мікроелементи, рухомі сполуки бору, родючість, рекультивация, техноземи.

Постановка проблеми

Техногенні едафотопи, які сформовані в процесі рекультивациі, значно відрізняються від зональних ґрунтів рівнем родючості (трофності), фізичними, фізико-хімічними, агрохімічними і іншими екологічно важливими показниками. Неоднорідність ґрунтового-геохімічного середовища призводить до високої варіабельності концентрацій елементів у ґрунтовому покриві [9]. Дослідження балансу мікроелементів виступає в якості фактора, що визначає потенціал продуктивності вирощуваних культур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Застосування мікродобрив – один із шляхів вирішення проблеми підвищення врожайності культур за рахунок малих витрат. Саме мікроелементи сприяють синтезу в рослинах повного спектру ферментів, які дозволяють інтенсивніше використовувати енергію, воду та макроелементи. Підвищення продуктивності

© І. В. Вагнер, В. І. Чорна

*Науковий керівник – д. б. н., професор В. І. Чорна

земель і біогеохімічних процесів не може бути вирішено без оптимізації мікроелементного складу ґрунтів, який є результатом взаємодії процесів їх утворення з вихідних материнських порід як джерел елементів у ґрунтах, а також латеральної і радіальної міграції елементів [4, 5, 8]. Бор є незамінним мікроелементом, необхідним для нормального росту і розвитку рослин. Управління бором є складним завданням, так як оптимальний діапазон застосування бору є вузьким і норми витрати варіюються в залежності від типу ґрунтів. Внесення бору зменшує вміст азоту і кальцію, але збільшує вміст фосфору, калію, марганцю, цинку і міді в тканинах рослин, за рахунок збільшення їх доступних форм у ґрунтах [12]. Найважливішими властивостями бору, які визначають його геохімічні особливості розподілу в ґрунтовому покриві, є відносно висока міграційна здатність у водних розчинах, а також активне біогенне поглинання і здатність адсорбуватися високодисперсними і органо-мінеральними компонентами ґрунтів [4]. Тому при вивченні техногенно-порушених ґрунтів та для пошуку шляхів їх відновлення є актуальним встановлення концентрації рухомих сполук бору у просторі та з глибиною.

Валовий вміст бору в дерново-підзолистих ґрунтах 2–5 мг/кг, в сірих лісових ґрунтах 3–9 мг/кг, в чорноземних 9–12 мг/кг ґрунту, але доступні для рослин водорозчинні сполуки бору складають всього від 3 до 10 % від його загальної кількості. Таким чином, велика частина бору знаходиться в ґрунтах у недоступних для рослин формах. Кількість водорозчинного бору в дерново-підзолистих ґрунтах 0,1–0,5 мг на 1 кг, в сірих лісових 0,3–0,7, а в чорноземних 0,4–1,7 мг на 1 кг ґрунту [13].

За ступенем забезпеченості водорозчинним бором (в мг на 1 кг) ґрунту поділяються на такі групи: I – дуже низький < 0,15 мг, II – низький 0,15–0,33 мг, III – середній 0,33–0,50 мг, IV – високий 0,50–0,70 мг, V – дуже висока > 0,70 мг [13].

На рухливість бору в ґрунті впливає вапнування, при якому вміст водорозчинного бору знижується. Це пояснюється тим, що під впливом вапнування в ґрунті посилюється діяльність мікроорганізмів, що використовують бор для побудови органічних речовин свого тіла. Значна частина бору пов'язана з органічною речовиною ґрунту. У процесі хімічного вивітрювання утворює аніони BO_2^+ , $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$, BO_3^{3-} , H_2BO_3^- , $\text{B}(\text{OH})_4$. Він може сорбуватися глинами, органічною речовиною і полугорними оксидами, останніми найбільш сильно. Основна роль у цьому процесі, мабуть, належить асоціації бору з кисневими і гідроксильними радикалами алюмосилкатів [6]. Найбільш звичайні в ґрунтових розчинах форми недисоційованого H_3BO_3 , в меншій мірі $\text{B}(\text{OH})_4$. При рН більше 7,0, ймовірно, присутні іони $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ і H_2BO_3^- . Особливістю бору є його більша сорбція в ґрунтах у порівнянні з іншими аніонами [13]. Елементами-осаджувачами бору є кальцій, магній, алюміній, залізо, манган. Бор у ґрунті адсорбується оксидами заліза і алюмінію, глинистими мінералами. При цьому

абсорбція залежить від рН і досягає максимуму в лужному середовищі. В цілому, сполуки бору найбільш мобільні в кислому і лужному середовищах [1, 16].

У ґрунті бор знаходиться у вигляді різних сполук. А. П. Виноградов (1957) виділяв такі форми мікроелемента: водорозчинний; кислоторозчинний; що знаходиться в ґратках силікатів; в складі борних мінералів; пов'язаний з органічною речовиною [2]. Бор, що знаходиться в складі рослинних залишків, стає доступним після їх мінералізації. Бор досить інтенсивно звільняється при їх розкладанні, займаючи за темпами мобілізації з рослинної речовини друге місце після міді. Це дозволяє розглядати мікроелемент у даній формі доступним для рослин [6]. За даними А. П. Виноградова, в рухомій формі знаходиться близько 10% ґрунтового бору, дослідження інших авторів свідчать про менш значну його розчинність: від 0,4 до 5% від загальної кількості мікроелемента [1, 16]. У засолених ґрунтах розчинність сполук бору може істотно зростати, досягаючи 25% і навіть 80% від його валового вмісту [6].

На адсорбцію бору різними компонентами ґрунту впливають реакція середовища, присутність різних катіонів, ступінь зволоження ґрунту. При збільшенні рН середовища зростає адсорбція бору глинистими мінералами, а максимум поглинання елемента оксидами заліза спостерігається при рН = 8,0 – 8,5, оксиди алюмінію адсорбують максимальну кількість бору при рН = 6,0 – 7,0. Закріпленню бору в ґрунті сприяють реакції його хімічного осадження. Основними іонами-осаджувачами бору є кальцій і магній [16]. Дефіцит бору призводить до зниження максимальної швидкості утворення фотосинтетичного O_2 і впливає на накопичення розчинних вуглеводів у листі [14, 21]. Дефіцит бору швидко впливає на функції ферментів та інших білків у плазматичній мембрані, процеси переносу через цілісну мембрану [11, 15].

Характерною рисою геохімії бору є його участь у процесах галогенеза. У зв'язку з цим практично у всіх регіонах земної кулі засолення ґрунтів супроводжується акумуляцією в них бору і розвитком борного засолення [8]. У зв'язку з цим потрібна більш глибока теоретична проробка питань про вплив бору на продуктивність і хімічний склад рослин і розробка практичних підходів до використання ґрунтів з високим вмістом бору [12, 17].

Мета, завдання та методика досліджень

Метою нашого дослідження було визначення особливостей просторової варіабельності та вертикальної диференціації концентрацій рухомого бору у дерново-літогенних ґрунтах на сіро-зелених, червоно-бурих глинах та на лесоподібних суглинках і на насипному шарі (0–40 см) чорнозему південного на лесоподібних суглинках та його екологічна роль у процесах ґрунтоутворення.

Дослідження проведені на експериментальних ділянках стаціонару з рекультивації земель Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету (м. Орджонікідзе) із закладенням ґрунтових розрізів на дерново-

літогенних ґрунтах на червоно-бурих, сіро-зелених глинах та на лесоподібних суглинках та на насипному шарі чорнозему південному на лесоподібних суглинках (далі – педозем). Проби відібрали по шарах 0–10 см, 10–20 см, ...90–100 см з чотирьох розрізів у трьохкратній повторюваності. Відібрано 180 проб ґрунту через кожні 15 метрів (крім ділянки насипного шару чорнозему на піску) (відповідно з ділянок насипного шару чорнозему на лесоподібних суглинках (далі – педоземи) та дерново-літогенних ґрунтів на сіро-зелених глинах (далі – С/З), з дерново-літогенних ґрунтів на червоно-бурих глинах (далі – Ч/Б) і з дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках (далі – Л/С). Відбір був проведений з глибини 0–20 см по всьому дослідному полі (географічні координати південно-західного кута полігона 47°38'55.24"Пн.Ш., 34°08'33.30"С.Д.).

Визначення рухомих сполук бору було здійснено за методикою «ГОСТ Р 50688-94. Почвы. Определение подвижных соединений бора по методу Бергера и Труога в модификации ЦИНАО» у п'ятикратній повторюваності [3].

Статистична обробка проведена за допомогою Statsoft Statistica 10.0. Отримані дані середніх значень подані на рис. 1–4, стандартні відхилення не перевищують 5%, що відповідає нормативам контролю якості результатів аналізу внутрішньо лабораторного контролю и характеризує їх як достовірні [3].

Результати досліджень

Екологічна роль доступного бору полягає в тому, що він зустрічається в ґрунті у двох формах – органічній та неорганічній. Мікроорганізмам і рослинам для нормального розвитку потрібен бор, тому вони використовують неорганічний бор і перетворюють його в органічні форми. Коли мікроорганізми і рослини завершують свої життєві цикли і вмирають, органічний бор окиснюється і переходить у неорганічний бор. Завдяки процесам вивітрювання, воді та мікроорганізмам, концентрація рухомих сполук бору підтримується у ґрунті. Факторами, що призводять до дефіциту бора, є його втрати з вимиванням, перетворення розчинної форми бору в недоступні форми і підвищення потреби в борі у кращих сортів культур і при інтенсивних методах землеробства.

За даними визначення концентрацій бору у просторі, побудовані математичні моделі за допомогою Surfer 11.0, що основані на кластерному аналізі значень.

Рухомі сполуки бору у просторі дуже мобільні та варіабельні і залежать від рельєфу місцевості, агрегатного складу ґрунтів, хімічного складу ґрунтів та багатьох інших факторів. Кількість рухомого бору у педоземі та лесах відповідно змінюється від 1,5 мг/кг до 3,8 мг/кг та від 2,2 мг/кг до 6,6 мг/кг. Ця математична модель наглядно демонструє розповсюдження даного мікроелементу. Найменше значення у педоземах визначено в північно-західній зоні ділянки, а загалом

середній показник бору на педоземах близько 3 мг/кг, що переважає у два рази вміст бору у еталонному чорноземі [13].

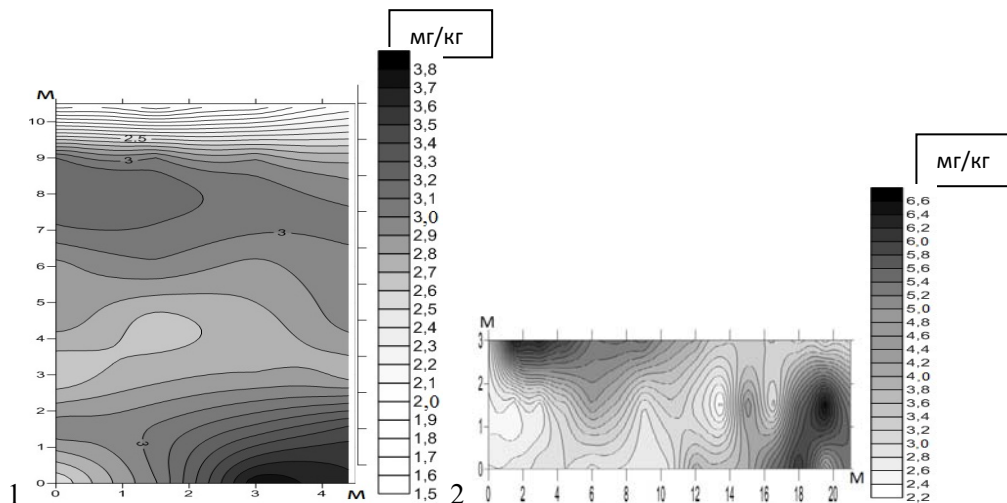


Рис. 1. Вміст рухомого бору на дослідних ділянках:

1 – насипний шар чорнозему південного (40 см) на суміші лесоподібних суглинках; **2** – дерново-літогенні ґрунти на лесоподібних суглинках, де: осі X, Y – довжина та ширина ділянки, кожен 1 м = 10 м;

На ділянці з Л/С спостерігаються дві зони з підвищеними концентраціями бору, які розташовані на північному сході і у центральній зоні, а також спостерігається перехідна зона, що формується між дерново-літогенними ґрунтами на Л/С і на С/З.

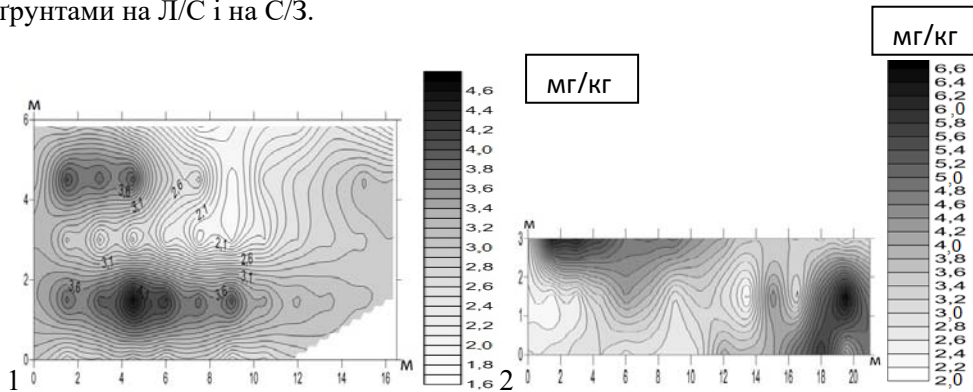


Рис. 2. Вміст рухомого бору на дослідних ділянках дерново-літогенних ґрунтів на суміші червоно-бурих (1) та сіро-зелених (2) глин, де: X, Y – довжина та ширина ділянки, кожен 1 м = 10 м

За вмістом рухомих сполук бору С/З схожі на педоземи і є більш придатними для нормального розвитку та росту рослин за цим показником. Ч/Б схожі на Л/С, де концентрація рухомого бору варіює від 2,0 мг/кг до 6,6 мг/кг, що у подальшому може призвести до борного засолення. Дослідження деяких авторів показали, що концентрації бору в ґрунті, що перевищують 5–10 мг/кг можуть стати причиною зниження врожайності сільськогосподарських культур [8, 9, 13, 18]. Бор характеризується особливими фізико-хімічними властивостями і своєрідною поведінкою в ландшафтах, де, завдяки високій міграційній здатності, піддається перерозподілу між ґрунтами підвищених і понижених ділянок території. Екологічна роль бору в системі ґрунт-рослини визначається, в першу чергу, його вмістом в ґрунтоутворюючій породі, яка є материнською основою ґрунту і встановлює ймовірність біогенного накопичення елемента у верхній частині профілю за рахунок рослинності, яка бере участь в ґрунтоутворенні [7].

Для визначення закономірностей вертикальної диференціації рухомих сполук бору за профілем техноземів був проведений кластерний аналіз.

При побудові дендрограми, яка визначає візуалізацію матриці подібності (чи відмінності) після об'єднання (або поділу) чергових двох об'єктів у кластер, був використаний метод одиночного зв'язку та евклідова відстань. Ці параметри засновані на тому, що відстань між двома класами визначається як відстань між найближчими їх представниками.

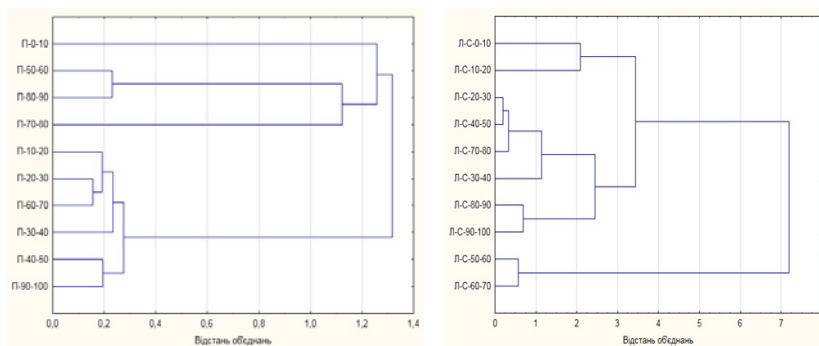


Рис. 3. Дендрограма вертикальної диференціації рухомих сполук бору у профілі педозему (А) та дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках (Б) методом одиночного зв'язку з використанням евклідової відстані

Примітка: П – педоземи, Л/С – дерново-літогенні ґрунти на лесоподібних суглинках; 0-10 см, 10–20 см,... – 90–100 см – шари відбору зразків.

Концентрація бору у профілі педозему варіює за глибиною та змінюється від 1,06 мг/кг до 2,98 мг/кг.

Розповсюдження рухомих сполук бору по шарах профілю характеризується їх об'єднанням у класи, що спостерігається на глибині 10–20 см, 20–30 см та 60–

70 см і 40–50 см та 90–100 см на відстані 0,25, далі з'єднується у другий клас з приєднанням шару 30–40 см, що характеризує ці шари як однорідні за вмістом бору. Важливу роль має відстань, на якій відбувається об'єднання показників. Чим вона менша, тим більш подібні досліджувані шари. Ця подібність дуже важлива саме у техногенно-порушених ґрунтах, які знаходяться на етапі формування.

Найбільш віддаленим значенням характеризується шар 0–10 см, що пояснюється тим, що при відмиранні основна біомаса рослин, яка містить бор, знаходиться саме у цьому шарі, там його концентрація і є найбільшою.

З даних, що представлені на рис. 5, видно, що вони варіюють у діапазоні від 1,90 до 9,56 мг/кг. Найбільша концентрації рухомого бору зафіксована на глибині 50–70 см, яка втричі перевищує максимальне значення, отримане на педоземах за вмістом рухомого бору по профілю з тенденцією його збільшення за глибиною. Відомо, що накопичення бору тісно пов'язане з буферною здатністю ґрунтів [19]. Дерново-літогенні ґрунти на лесоподібних суглинках найбільш неоднорідні за вмістом бору: прослідковуються клас у шарі 0–20 см, який є найбільш «активним» у етапі ґрунтогенезу дерново-літогенних ґрунтів у системі ґрунт-рослина; далі клас з шарами від 20–50 см, який є найбільшим сформованим об'єднанням у цьому профілі; класи 50–70 см, які є найбільш віддаленими та виходять з групи, що можливо пояснюється перехідною зоною темно-коричневих суглинків у червоно-бурій глини на цій глибині [10], де концентрується найбільша концентрація бору у профілі. Бор має тенденцію до накопичення в гумусовому горизонті, в той же час, може вимиватися до ґрунтових вод. Така поведінка бору пояснюється тим, що борорганічні з'єднання не володіють хімічною стійкістю [10, 20].

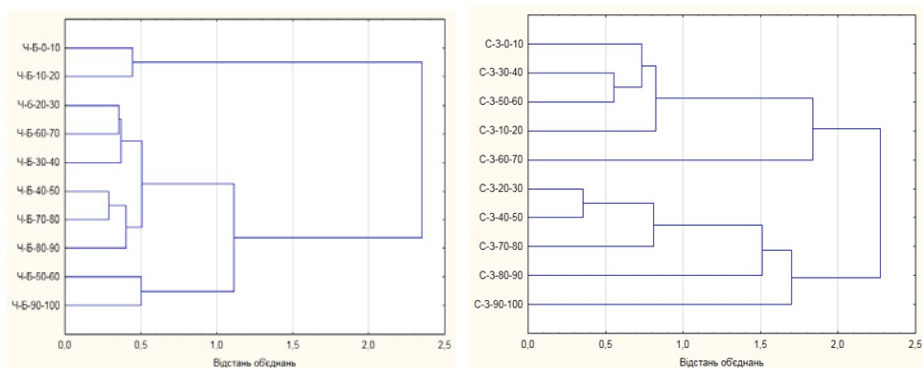


Рис. 4. Дендродіаграма вертикальної диференціації рухомих сполук бору у дерново-літогенних ґрунтах на червоно-бурих та сіро-зелених глинах методом одиночного зв'язку з використанням евклідової відстані

Примітка: Ч–Б – дерново-літогенні ґрунти на червоно-бурих глинах, С–З – дерново-літогенні ґрунти на сіро-зелених глинах; 0–10 см, 10–20 см,... – 90–100 см – шари відбору зразків.

За вмістом рухомого бору дерново-літогенні ґрунти на червоно-бурих глинах характеризуються неоднорідністю за профілем та варіюють від 1,11 до 3,41 мг/кг. Прослідковується тенденція збільшення концентрації з глибиною. Зафіксовані найменші значення концентрації рухомого бору на глибині 0–20 см (1,11 мг/кг), пояснюються тим, що бор дуже рухома сполука, яка добре розчиняється у воді, а при відсутності гумусового горизонту не затримується у верхніх шарах ґрунту [6, 12]. Найважливіші властивості бору, що визначають його розподіл в ґрунтовому профілі – відносно висока міграційна здатність у водних розчинах, активне біогенне поглинання, здатність адсорбуватися високодисперсними мінеральними і органо-мінеральними компонентами ґрунтів. Як правило, вміст бору вище в горизонтах з більшою часткою важких гранулометричних фракцій ґрунту. Вміст бору у дерново-літогенних ґрунтах на червоно-бурих глинах у шарах 20–90 см характеризується як однорідний, сформований, що пов'язане з ґрунтоутворними процесами та формуванням дерново-літогенних ґрунтів.

У дерново-літогенних ґрунтах на сіро-зелених глинах концентрація рухомого бору змінюється від 3,91 до 7,97 мг/кг. Дефіцит бору спостерігається в ґрунтах з низькою активністю глини [20], хоча дерново-літогенні ґрунти на сіро-зелених глинах мають найбільший вміст фізичної глини [7] серед досліджуваних ґрунтів, але за вмістом бору найбільше значення встановлене на дерново-літогенних ґрунтах на лесоподібних суглинках. Рекультоземи характеризуються специфічною агрегатної структурою, що підтверджується статистично та пояснює варіювання концентрації рухомого бору у профілі. Значна вертикальна неоднорідність є характерною властивістю рекультоземів так як розкривні гірські породи, які розробляються навіть з одного стратиграфічного ярусу, не можуть бути охарактеризовані як однорідні субстрати [19, 21]. Вміст бору у дерново-літогенних ґрунтах на сіро-зелених глинах формує два класи однорідності цього мікроелемента у шарах. Бачимо, тенденцію тісних зв'язків між шарами на глибині 0–50 см та 50–100 см по відстаням і утвореним класам.

Концентрація бору в ґрунтовому розчині контролюється реакціями абсорбції та десорбції цього мікроелемента. Швидкість десорбції бору залежить від значень рН, мінералогічного складу і розміру часток ґрунтів. Нами встановлено, що рН досліджуваних ґрунтів коливається у межах 7,0–7,9, що характеризує ґрунти як слабо лужні, що не повинно сприяти накопиченню бору. Тому можливо припустити, що його накопичення у нижніх шарах профілів досліджуваних ґрунтів пов'язане з абсорбцією глинистими фракціями. У роботах дослідників встановлено, що ці ґрунти характеризуються як важко суглинкові муловато-пилові, де домінує крупний пил та мулиста фракція, які складають >77%. Мулиста фракція є активною складовою будь-яких ґрунтів, що якраз і сприяє накопиченню та вивільненню цього елемента та його міграції по профілю [7, 10].

Висновки та перспективи подальших досліджень

Загальна оцінка стану досліджуваних техноземів за вмістом рухомих сполук бору за градацією зональних ґрунтів характеризується як дуже висока ($>0,7$ мг/кг), свідчить про високий потенціал для перспективи вирощування с/г культур.

Концентрація рухомого бору у техногенно-порушених ґрунтах перевищує значення еталонних зразків (чорнозем південний) та його вміст у чорноземних ґрунтах у декілька разів, що у подальшому може призвести до борного засолення.

Побудовані математичні моделі просторової варіабельності та дендрограми розмаху вертикальної диференціації рухомих сполук бору дослідних ділянок Нікопольського марганцеворудного басейну. Встановлено, що велика роль у міграції бору, його накопиченні, сорбції та десорбції грає материнська порода та рослини. Найбільші евклідові відстані і неоднорідність шарів профілів досліджуваних ґрунтів за вмістом рухомих сполук бору зафіксовані на дерново-літогенних ґрунтах на лесоподібних суглинках, де встановлене найбільше значення цього показника.

Усі типи ґрунтів знаходяться на етапі формування, тому у профілях є сформовані ділянки шарів, де відбувається сорбція та десорбція рухомого бору, але не по всій глибині. Згідно з проведеним кластерним аналізом найбільш сформовані профілі педоземі і дерново-літогенних ґрунтів на сіро-зелених та червоно-бурих глинах.

Подальші дослідження слід зосередити на процесах антагонізму та синергізму рухомого бору з іншими елементами (кальцій, азот, залізо, марганець), прослідкувати взаємовідносини аморфного кремнію та бору у ґрунтах.

Література

1. Азаренко Ю. А. Закономерности распределения и взаимосвязи микроэлементов в системе почва-растение в условиях юга Западной Сибири : автореф. дисс. на соискание учен. степени д-ра биол. наук : спец. 19.11.14 / Ю. А. Азаренко. – Тюмень, 2014. – 36 с.
2. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах / А. П. Виноградов. – 2-е изд., доп. – М. : Изд-во АН СССР, 1957. – 234 с.
3. Определение подвижных соединений бора по методу Бергера и Труога в модификации ЦИНАО : ГОСТ Р 50688-94. – М. : Изд-во стандартов, 1994. – 16 с.
4. Добровольский В. В. Основы биогеохимии : учебник / В. В. Добровольский. – М. : Академия, 2003. – 400 с.
5. Добровольский В. В. Геохимия микроэлементов в почве и биосфере / В. В. Добровольский // Почвоведение. – 1984. – № 12. – С. 68–78.

6. Орлова Э. Д. Микроэлементы в почвах и растениях Омской области и применение микроудобрений : учеб. пособие / Э. Д. Орлова, Е. Г. Пыхтарева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Омск : Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2007. – 76 с.

7. Пространственная агроэкология и рекультивация земель : монография / [А. А. Демидов, А. С. Кобец, Ю. И. Грицан, А. В. Жуков]. – Днепропетровск : Свидлер А. Л., 2013. – 560 с.

8. Спицына С. Ф. Поведение бора в системе почва-растение на территории сухой засушливой и умеренно-засушливой Степи Алтайского края / С. Ф. Спицына, А. А. Томаровский, Г. В. Оствальд // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. – 2015. – № 11 (133). – С. 30–35.

9. Тарика А. Г. Агроэкологическое обоснование освоения и использования лессовидного суглинка при рекультивации земель в Никопольском марганцеворудном бассейне : автореф. дисс. на соискание научной степени канд. с.-х. н аук : спец. 03.00.16. «Экология» / А. Г. Тарика. – Днепропетровск, 2006. – 25 с.

10. Чорна В. І. Екологічна роль бору у техногенно-порушених ґрунах. Вода: проблеми та шляхи вирішення / В. І. Чорна, І. В. Вагнер // Зб. статей наук.-практ. конф. з міжнар. участю, м. Рівне, 6–8 липня 2016 р. – Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2016. – С. 270.

11. Uptake and transport of boron / P. H. Brown, N. Bellaloui, R. N. Sah, E. Bassil, H. Hu // Boron in plant and animal nutrition / eds. H. E. Goldbach, B. Rerkasem, M. Wimmer, P. H. Brown, M. Thellier, R. W. Bell. - New York : Kluwer Academic, 2002. – P. 87–102.

12. Response of Chickpea Cultivars to Application of Boron in Boron-Deficient Calcareous Soils / E. Ceyhan, M. Önder, M. Harmankaya [et al.] // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2007. – Vol. 38, Issue 17/18. – P. 2381–2399.

13. Boron application improves on yield and chemical composition of strawberry / A. Esringü, M. Turan, A. Gunes [et al.] // Acta Agriculturae Scandinavica. Section B — Soil & Plant Science. – 2011. – Vol. 61, Issue 3. – P. 245–252.

14. El-Shintinawy F. Structural and functional damage caused by boron deficiency in sunflower leaves / F. El-Shintinawy // Photosynthetica. – 1999. – 36. – P. 565–573.

15. Rapid responses of plants to boron deprivation / H. E. Goldbach, M. A. Wimmer, F. Chaumont [et al.] // Boron in plant and animal nutrition / eds. H. E. Goldbach, B. Rerkasem, M. Wimmer, P. H. Brown, M. Thellier, R. W. Bell. – New York : Kluwer Academic, 2002. – P. 167–180.

16. Goldberg S. Reactions of boron / S. Goldberg // Plant and soil. – 1997. – Vol. 193. – P. 35-48.

17. Gu B. Observations on the effect of a soil polysaccharide fraction on boron adsorption by clay minerals / B. Gu, L. E. Lowe // Can. J. Soil Sci. – 1992. – Vol. 72. – P. 623-626.

18. Effects of Bio-Bor Fertilizer Applications on Fruit Yield, Antioxidant Enzyme Activity and Freeze Injury of Strawberry / A. Gunes, M. Turan, N. Kitir [et al.] // *Erwerbs-Obstbau*. – 2016. – Vol. 58, Issue 3. – P. 177–184.

19. Boron Nutrition and Chilling Tolerance of Warm Climate Crop Species / L. Huang, Z. Ye, B. Bell, R. W. Dell // *Ann Bot.* – 2005. – 96 (5). – P. 755–767.

20. Oyinlola E. Y. Effect of Boron Fertilizer on Yield and Oil Content of Three Sunflower Cultivars in the Nigerian Savanna / E. Y. Oyinlola // *Journal of Agronomy*. – 2007. – Vol. 6, Issue 3. – P. 421–426.

21. Boron as limiting factor in photosynthesis and growth of sunflower plants in relation to phosphate supply / M. Plesnicar, R. Kastori, Z. Sakac [et al.] // *Agrochimica*. – 1997. – 41. – P. 144–154.
