

УДК 631.67:550.461

**ОСОБЛИВОСТІ МІГРАЦІЇ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ
У СТЕПОВІЙ ЗОНІ УКРАЇНИ**

Т.М. ЄГОРОВА

Інститут агроекології і природокористування НААН

Узагальнено гідрохімічні чинники зрошувальної гідромеліорації. Розглянуто екологічне значення водної міграції важких металів для земель сільськогосподарського використання. Викладено ландшафтно-геохімічні особливості водної міграції на території Степу. Розраховано та узагальнено коефіцієнти водної міграції Zn, Mo, Sr, Co, Ba, Pb, V, Mn, Ni, Cu, Cr у агроландшафтах Степової зони України різного

© Т.М. Єгорова, 2014

Меліорація і водне господарство. 2014. Вип. 101

функціонального використання. Проаналізовано вплив рухомості важких металів на еколого-геохімічні процеси та особливості біогеохімічних ланцюгів степових агроландшафтів. Надано рекомендації щодо моніторингу поливних вод для зрошувальної гідромеліорації на півдні України.

Ключові слова: степові агроландшафти, водна міграція, важкі метали, еколого-геохімічні процеси

Постановка проблеми. Кліматичні і ґрунтові особливості Степових ландшафтів України обумовили формування тут потужної регіональної системи зрошувальної гідромеліорації. Степ України займає 40% території держави, 75% яких є орні землі переважно у межах родючих чорноземів звичайних і південних; на 13% площі ріллі проводиться зрошувальна меліорація. Основою для створення екологічно безпечних і водночас економічно життєздатних меліоративних систем є виявлення як антропогенних, так і природних чинників розвитку тут комплексних екологічних проблем [1].

До останнього часу, з числа багатьох екологічних проблем біотопів і біоценозів, що виникають при зрошенні земель, головна увага приділяється осолонцюванню ґрунтів і кількісному виснаженню водних ресурсів, а також забрудненню поливних вод важкими металами, радіоактивними речовинами, пестицидами і мікроорганізмами [2]. У відповідності до цих проблем розроблено критерії і норми для еколого-токсикологічних і санітарно-бактеріологічних показників зрошувальних вод [3, 4].

Між тим, забезпеченість сільгоспкультур поживними елементами, а також перерозподіл важких металів у біогеохімічних ланцюгах, значною мірою залежить від особливостей водної фізико-хімічної міграції, які обумовлені загальною рухомістю хімічного елемента та ландшафтно-геохімічними факторами [5]. Саме цим питанням та їх практичній значимості присвячені представлені дослідження.

Стан вивчення проблеми. Перерозподіл хімічних елементів у системі ґрунтоутворюючі породи-ґрунт-води-агроценоз щільно пов'язаний з інтенсивністю та напрямком водної фізико-хімічної міграції у зоні аерації. Теорія процесів переміщення хімічних елементів у зоні гіпергенезу була вперше викладена в 20-х роках минулого століття у

працях О.Є. Ферсмана і Б.Б. Полинова [4]. У роботах О.І. Перельмана процес міграції хімічних елементів, який призводить до їх концентрації і розсіювання у просторі і часі, набув практичного втілення. Вчений визначив основні форми руху хімічних елементів як 4 види геохімічної міграції – механічна, біогенна, техногенна і фізико-хімічна (повітряна і водна); фактори міграції він розподілив на зовнішні (структура та хімізм ландшафтів) і внутрішні (хімічні властивості елементів) [4].

Водна фізико-хімічна міграція обумовлена переважно процесами розчинення, кристалізації і сорбції у гідрологічних і гідрогеологічних природних системах; вона підпорядкована фізико-хімічним законам і має визначальне значення у геохімічному кругообігу та перерозподілі хімічних елементів у ландшафтах. Зазначимо, що хімічні елементи переходять із гірських порід у поверхневі води з різною інтенсивністю, яку висвітлюють природні значення коефіцієнтів водної міграції (K_x), відповідно до яких О.І. Перельман запропонував таку класифікацію водних мігрантів: дуже рухомі ($K_x = 10n - 100n$), легко рухомі ($K_x = n - 10n$), рухомі ($K_x = 0, n - n$), слабо рухомі та інертні ($K_x < 0, n$) [4]. Чим вище водна рухомість елемента, тим більш інтенсивною є його біогенна міграція та її коефіцієнти, тим вище його біофільність і можливість впливати на стан агроценозів [4, 6, 7].

Сучасні наукові засади розвитку меліорації земель в Україні орієнтовані на вирішення практичних задач, пов'язаних із підвищенням врожайності сільгоспкультур та екологічною безпекою водних ресурсів. В умовах зростаючого сталого зовнішнього попиту на продукти харчування простежується тенденція до збільшення площ зрошення у Степовій зоні України [8]. Інтенсивний напрям розвитку землеробства за рахунок розширення площ зрошуваних земель вимагає просторової оцінки і диференціації агрогідрохімічних процесів на цих сільсько-господарських землях.

Провідним напрямом досліджень територій зрошення є вивчення мінералізації і макрокомпонентного складу поливних вод з позицій їх іригаційного оцінювання та впливу на засолення ґрунтів; цим питанням присвячені роботи П.С. Лозовицького, І.В. Ткаченко та інш. [9]. Агрогідрохімічні особливості міграції важких металів у поливних водах України розглядаються в роботах С.А. Балюка, В.Я. Ладних, Л.А. Чаусової, М.А. Захарової, інш. [10, 11]. М.А. Захаровою вивчалися балансові співвідношення вмісту у поливних водах, орному шарі чорнозему

типового та овочевих культурах Zn, Cd, Ni, Co, Fe, Mn, Pb, Cu; її висновком стало твердження про інтенсивний винос із ґрунту поживних елементів та, відповідно до цього, створений дефіцит мікроелементів у агроценозах зрошуваних ландшафтів [11].

Б.Ф. Міцкевичем було виконано розрахунки та регіональний аналіз рухомості Sr, Pb, V, Ni, Cu, Cr у системі гірські породи-води за коефіцієнтом водної міграції; проведені дослідження засвідчили зниження рухомості Sr, Pb, V, Cu у степових геохімічних ландшафтах центральної частини України порівняно із нормальними граничними значеннями у континентальних водах за О.І. Перельманом [5, 12].

Методологія вивчення та екологічного аналізу процесів природно-техногенної міграції важких металів на землях сільськогосподарського призначення України була розроблена нами в Інституті агроекології і природокористування НААН на ландшафтно-геохімічних принципах із урахуванням функціонального зонування [7, 13].

Мета і методика досліджень. Представлений в роботі екологічний аналіз рухомості важких металів в агроландшафтах Степової зони України різного функціонального призначення дає нові можливості для прогнозування забезпеченості агрокультур певними поживними елементами на зрошених землях та оптимізації підготовки поливних вод.

Аналіз зовнішніх факторів особливостей переходу певних мікроелементів із ґрунтів у поливні води і далі у сільгоспродукцію проведено на основі ландшафтно-геохімічних умов міграції та поширення зональних геохімічних бар'єрів [6, 13]. Особливості внутрішніх факторів водної міграції важких металів, а також поживних мікроелементів у агроландшафтах проведено за розрахунками коефіцієнтів водної міграції (K_x) 12 мікроелементів (Zn, Mo, Sr, Co, Ba, Pb, V, Mn, Ni, Cu, Cr) для малих річок, які розраховували за формулою О.І. Перельмана [5, 7]:

$$K_x = (m_x * 100) / (a \times n_x),$$

де m_x – вміст елемента X у воді (мг/л), a – мінералізація води (мг/л), n_x – вміст елемента X у гірській породі (%).

Для розрахунків використано створену автором інформаційну базу даних «Екологічна геохімія – 2000», яка включає сполучені аналітичні дані спектральних аналізів важких металів у сухому залишку вод та мулуватій фракції донних відкладів, що були отримані при гідролітохімічній зйомці України [14]. Відхилення отриманих K_x для агроландшафтів певного функціонального підтипу земель від нормальної

рухомості мікроелементів дало можливість визначити групи елементів додаткового внесення у поливні води, що здатне покращити біохімічні особливості агроценозів у Степових ландшафтах України.

Результати досліджень. Ландшафтно-геохімічні особливості водної міграції важких металів у степових агроландшафтах України визначаються переважно аридністю клімату, однорідністю природної структури ландшафтів та якісною деградацією ґрунтів і поверхневих вод на землях зрошувальної меліорації [6, 14]. Природну гідрохімічну зональність поверхневих вод висвітлює зростання загальної мінералізації та зміна хімічного типу вод від гідрокарбонатних кальцієвих прісних на півночі до сульфатних магнієвих солонуватих на півдні. Ландшафти зони Степу відносяться до кальцієвого класу міграції (Ca^{2+}) із окиснювальними умовами, який контролюється поширенням чорноземів звичайних і південних, та комплексного кальцій – глейового – натрієвого класу (Ca^{2+} - Fe^{2+} , Na^{+}) із глейовими умовами, який контролюється поширенням оглеєних лучних солонцюватих і чорноземних ґрунтів. Інтенсивність виносу більшості хімічних елементів із ґрунтового шару у цих агроландшафтах є незначною. Аридність клімату та висока мінералізація природних вод сприяють формуванню тут випаровувальних фізико-хімічних бар'єрів природного і природно-техногенного генезису, як солончакового типу, так і карбонатного [5, 6]. Завдяки цьому у ґрунтах агроландшафтів накопичується значна кількість катіонів, що потрапляють із атмосферних опадів, природних вод та, значною мірою, із поливних вод. Нейтральне та лужне середовище та низька розчинна здатність природних розчинів сприяють концентрації у ґрунтах, крім інших, Zn, Mo, Sr, Ba, Pb, V, Mn, Ni, Cu, Ca, Na, Cl. Між тим, регіональні дослідження автора з екологічного оцінювання фонового вмісту важких металів у Степових агроландшафтах України, засвідчили інтенсивну техногенно-природну концентрацію у поверхневих водах – більшості важких металів, у ґрунтах – лише Cu і Zn [14].

Розрахунки коефіцієнтів водної міграції надають можливість виявити закономірності еколого-геохімічних процесів у Степових агроландшафтах в умовах богарного землеробства та зрошувальної меліорації (табл. 1, 2).

**1. Статистичні параметри коефіцієнтів водної міграції
легкорухомих і слаборухомих важких металів
у функціональних зонах агроландшафтів Степу України**

Функціональна зона агроландшафтів	Статистичні параметри розподілу Кх важких металів: розбіг значень (у чисельнику) і середньостатистичне (у знаменнику)			
	Sr	Mo	Zn	Cr
Рухомість за О.І. Перельманом [5]	легкорухомі			слаборухомі
Рілля (n = 267)	<u>0,03–24</u> 4,0–4,5	<u>0,03–15</u> 1,9–1,7	<u>0,01–10</u> 0,4	<u>0,002–2,5</u> 0,3
Багаторічні культури (n = 78)	<u>0,5–15</u> 4,4–4,2	<u>0,3–12</u> 2,1–1,8	<u>0,04–1,3</u> 0,6–0,3	<u>0,001–0,6</u> 0,1
Селища та села (n = 431)	<u>0,5–32</u> 4,8	<u>0,1–20</u> 2,0–2,1	<u>0,03–13,3</u> 0,5	<u>0,002–6,5</u> 0,3
Глобальні норми Кх за О.І. Перельманом [5]	n –10n (1–90)	n –10n (1–90)	n –10n (1-90)*	< 0,n (< 0,1)
Оцінювання водної фізико-хімічної міграції				
Поширення рухомих і легкорухомих умов міграції,% проб	99–100	99–100	62–76	16–33
Поширення слаборухомих умов міграції, % проб	0–1	0–1	24–38	67–84

Примітка: * – цифри, які прийняті для розрахунків

**2. Статистичні параметри коефіцієнтів водної міграції
рухомих важких металів
у функціональних зонах агроландшафтів Степу України**

Функціональна зона агроландшафтів	Статистичні параметри розподілу Кх важких металів: розбіг значень (у чисельнику) і середньостатистичне (у знаменнику)						
	Cu	Ni	Ba	Co	V	Mn	Pb
1	2	3	4	5	6	7	8
Рілля (n=267)	<u>0,05–6</u> 0,4	<u>0,0–4</u> 0,5–0,4	<u>0,04–3</u> 0,4	<u>0,04–1,6</u> 0,3–0,2	<u>0,02–0,6</u> 0,2	<u>0,002–</u> <u>2,5</u> 0,3	<u>0,01–1</u> 0,1
Багаторічні культури (n=78)	<u>0,1–1</u> 0,3	<u>0,1–3</u> 0,3	<u>0,03–3</u> 0,4	<u>0,1–1,5</u> 0,2	<u>0,1–1,7</u> 0,2	<u>0,01–2</u> 0,4-0,2	<u>0,02–</u> <u>0,6</u> 0,1

1	2	3	4	5	6	7	8
Селища та села (n=431)	<u>0,1–2,5</u> 0,4	<u>0,02–6</u> 0,5	<u>0,03–8</u> 0,4	<u>0,1–2,6</u> 0,3	<u>0,03–1,9</u> 0,2	<u>0,004–10</u> 0,5 0,4	<u>0,004–1</u> 0,1
Глобальні норми Кх за О.І.Перельманом [5].	0,n–n (0,1–5)*	0,n–n (0,1–5)	0,n–n (0,1–5)	0,n–n (0,1–5)	0,n–n (0,1–5)	0,n–n (0,1–5)	0,n–n (0,1–5)
Оцінювання водної фізико-хімічної міграції							
Поширення рухомих і легкорухомих умов міграції, % проб	88–92	70–80	70–71	56–62	50–57	33–39	17–22
Поширення слаборухомих умов міграції, % проб	8–12	20–30	29–30	38–44	43–50	61–67	78–83

Проведені розрахунки свідчать, що коливання коефіцієнтів водної міграції розглянутих мікроелементів в агроландшафтах Степу України є більш диференційовані, ніж їх глобальні оцінки.

Аналіз рухомості важких металів у розглянутих функціональних зонах земель сільськогосподарського використання свідчить про незначні відміни у коливаннях розбігу та середньостатистичних оцінках коефіцієнтів водної міграції, як і інших статистичних параметрів. Однак для мікроелементів легкорухомих та частини рухомих (Co, V, Cu) спостерігається відносно зниження рухомості у межах орних земель та зростання – у межах селищ і сіл, що може бути обумовлене підвищенням тут ролі зрошувальної меліорації у межах приватних господарств.

По відношенню до глобальних норм коефіцієнтів водної міграції, які розраховані О.І. Перельманом, рухомість Zn до рівня $K_x \leq 1$ знижено у межах 95–100%, Sr – 7–13%, Mo – 50–63% площі досліджених функціональних зон агроландшафтів. Це свідчить про зниження біогеохімічної активності цих мікроелементів, у першу чергу Zn, та формування їх дефіциту у сільгоспкультурах. Площі ландшафтів, де рухомість інших мікроелементів є пониженою відносно глобальних норм, дещо менші. Слабку рухомість у водному середовищі на рівні $K_x \leq 0,1$ та, відповідно, у біогеохімічних ланцюгах, тут проявлять всі рухомі важкі метали. Площі поширення агроландшафтів із недостатньо низькою рухомістю цих мікроелементів становлять від 83 до 8% і

зменшуються у ряду $Pb < Mn < V < Co < Ba < Ni < Cu$. Зазначена послідовність важких металів визначає регіональні особливості їх накопичення у депонуючому середовищі ґрунтового покриву та зростання площ імовірного забруднення сільгоспкультур.

Кореляційний аналіз мінералізації поверхневих вод Степових агроландшафтів та K_x важких металів засвідчив відсутність між ними значимої лінійної кореляції: для розглянутих функціональних зон r коливається від -0,1 до -0,3.

Висновки та пропозиції. Регламентовані в Україні екологічні оцінки якості зрошувальної води за вмістом важких металів обмежені їх абсолютними рівнями і не враховують вплив на біогеохімічні ланцюги та еколого-геохімічні процеси в агроландшафтах. Природні ландшафтні особливості процесів водної міграції у Степовій зоні України обумовлюють фізико-хімічну концентрацію більшості важких металів на природних випаровувальних і кальцієвих геохімічних бар'єрах, що сформовані у ґрунтовому шарі і ґрунтоутворюючих породах. Розрахунки коефіцієнтів водної міграції надали можливість кількісно оцінити рухомість Zn, Mo, Sr, Co, Ba, Pb, V, Mn, Ni, Cu, Cr у агроландшафтах різного функціонального використання. Аналіз рухомості розглянутих мікроелементів засвідчив пріоритет природних ландшафтно-геохімічних процесів та нівелювання техногенного впливу на водну рухомість важких металів у сучасних агроландшафтах Степу України.

Між тим, інтенсивність водної міграції більшості досліджених мікроелементів коливається у широкому інтервалі і має просторову диференціацію. На більшій половині площі Степових агроландшафтів України пониженою відносно глобальних оцінок є рухомість Zn, Mo, Mn, Pb; на третині площі – рухомість Co, Ba, V, Ni. Як результат, це спричиняє нестачу життєвонеобхідних Zn, Mo, Mn, Co, Ba у біогеохімічних ланцюгах та сільгоспродукції на території зазначених агроландшафтів; поряд з цим, відбувається їх інтенсивна концентрація у ґрунтовому шарі, що може помилково бути віднесено до небезпечного техногенного забруднення.

Вирішення екологічних питань хімічної меліорації ґрунтів по 40% поливних вод, що відносяться до обмежено придатних і непридатних, потребує додаткового аналізу ландшафтно-геохімічних особливостей процесів водної міграції. При виконанні моніторингу поливних вод для зрошувальної меліорації на півдні України доцільним є включення до числа параметрів їх екологічної оцінки коефіцієнта водної міграції.

Враховуючи значну просторову диференціацію водної рухомості важких металів та вплив цих процесів на забезпеченість продукції рослинництва поживними мікроелементами, доцільним є проведення агроекологічного районування Степової зони України. Поряд із загальними екологічними параметрами поливних вод необхідним є урахування характеру еколого-геохімічних процесів, включаючи водну і біогенну міграцію важких металів на основі інформативних кількісних параметрів їх рухомості.

1. *Исаева С.Д.* Устойчивость геосистем и оценка экологической опасности при мелиоративном и водохозяйственном воздействии / С.Д. Исаева // Мелиорация и водное хозяйство. – 2002. – № 4. – С. 15–19.

2. *Екологічні проблеми землеробства* / [І.Д. Примака, Ю.П. Манько, Н.М. Рідей та інш.]; під ред. І.Д. Примака. – К.: Центр учбової літератури, 2010. – 456 с.

3. *Якість води для зрошення. Екологічні критерії.* ВНД 33-5.5-02-97. *Видання офіційне.* Державний комітет України по водному господарству. – Харків, 1998. – 19 с.

4. *ДСТУ 2730-94 Система стандартів у галузі охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання ресурсів. Якість природної води для зрошення. Агрономічні критерії.*

5. *Перельман А.И.* Геохимия ландшафтов / А.И. Перельман. – М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.

6. *Ландшафтно-экогеохимическая карта Украины масштаба 1:500 000.* / Е.И. Ольшевская, Л.С. Галецкий, Г.Л. Сонкина, Т.М. Егорова. // Прикладная геохимия. – М.: ИМГРЭ. – 2001. – Вып. 2. Экологическая геохимия. – С. 306–316.

7. *Єгорова Т.М.* Водна міграція токсичних мікроелементів у функціональних зонах України / Т.М. Єгорова // Мінеральні ресурси України. – 2004. – № 1. – С. 41–44.

8. *Ромащенко М.І.* Наукові засади розвитку меліорації земель в Україні / М.І. Ромащенко // Водне господарство України. – 2013. – № 1. – С. 35–42.

9. *Лозовицький П.С.* Статистичні закономірності зв'язку між хімічним складом і мінералізацією зрошувальних вод / П.С. Лозовицький // Водне господарство України. – 2004. – № 3–4. – С. 48–56.

10. *Зрошувані ґрунти* / С.А. Балюк, В.Я. Ладних, О.А. Носоненко та ін. // Ресурсозберігаючі технології хімічної меліорації ґрунтів в умовах земельної реформи. – К.: 2000. – С. 45–61.

11. *Захарова М.А.* Агрогеохімічні закономірності міграції та акумуляції важких металів у зрошуваних ґрунтах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. с./г. наук: спец. 06.01.03 «Агроґрунтознавство і агрофізика» / М.А. Захарова. – Харків: Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського». – 2003. – 25 с.

12. *Міцкевич Б.Ф.* Геохімічні ландшафти Українського щита / Б.Ф. Міцкевич. – К.: Наукова думка. – 1971. – 174 с.

13. *Єгорова Т.М.* Ландшафтно-геохімічна структура території України як методологічна основа еколого-геохімічних досліджень. / Т.М. Єгорова // Екологія та охорона довкілля. – 2003. – № 2. – С. 71–77.

14. *Єгорова Т.М.* Ландшафтна екологія України. (Геохімічні аспекти): підруч. для студентів екологічних спеціальностей / Т.М. Єгорова. – Кам'янець-Подільський: Вид-во Заволейко В.Д. – 2009. – 192 с.

Обобщены гидрохимические факторы оросительной гидромелиорации. Рассмотрено экологическое значение водной миграции тяжёлых металлов для земель сельскохозяйственного использования. Изложены ландшафтно-геохимические особенности водной миграции на территории Степи. Рассчитаны и обобщены коэффициенты водной миграции Zn, Mo, Sr, Co, Ba, Pb, V, Mn, Ni, Cu, Cr в агроландшафтах Степной зоны Украины разного функционального использования. Рассмотрено влияние подвижности тяжёлых металлов на эколого-геохимические процессы и особенности биогеохимических цепочек степных агроландшафтов. Даны рекомендации для мониторинга поливных вод гидромелиорации юга Украины.

In the article the hydrochemical aspects of irrigation reclamation are generalized, the ecological value of water migration of heavy metals for agricultural land is considered, the landscape-geochemical characteristics of water migration in the Steppe zone are stated, the coefficients of water migration of Zn, Mo, Sr, Co, Ba, Pb, V, Mn, Ni, Cu, Cr in agricultural landscapes of the Steppe zone of Ukraine of different functional use are calculated and summarized. The influence of heavy metals mobility on ecological and geochemical processes and the features of biogeochemical chains of the steppe agricultural landscapes are considered in the article as well as the recommendations relative to the monitoring of irrigation water in the south of Ukraine are given.