
МЕЛІОРАЦІЯ І РОДЮЧІСТЬ ҐРУНТІВ

MELIORATION AND SOIL FERTILITY

УДК 633.877.3;630*2(292.486)

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.38>

ВПЛИВ ЗВОЛОЖЕННЯ ҐРУНТУ НА ЗДАТНІСТЬ ДО ПОГЛИНАННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ *SALIX CAPREA* ТА *POPULUS TREMULA* НА МАРГІНАЛЬНИХ ЗЕМЛЯХ

Голобородько К.К. – д.б.н., професор,
головний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії наземної екології,
лісового ґрунтознавства та рекультивації земель,
Науково-дослідний інститут біології
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Ловинська В.М. – д.с.-г.н.,
керівник науково-дослідної лабораторії лісового господарства,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Ситник С.А. – д.с.-г.н.,
головний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії
лісового господарства,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Потенційно токсичні елементи, які призводять до забруднення та деградації ґрунтів, потрапляють у кругообіг речовин та окремі ланки ланцюгів живлення. Деревні рослини часто виступають ключовим об'єктом акумулювання токсикантів із вилученням їх із кругообігу речовин на тривалій період. Однак до цього часу існують прогалини, які б могли пояснити концепцію взаємозв'язків та ефектів впливу різних факторів довкілля, зокрема, вмісту води у субстраті та кліматичних показників на процеси надходження та перерозподіл у частинах рослин. Зараз багато місць вважаються залишеними через високу концентрацію потенційно токсичних металів. Знешкодження токсичних металів вимагає розробки екологічно чистих процесів вилучення їх із кругообігу речовин. Вивчено реакцію рослин на підвищені концентрації Cd, Pb і As в ґрунті з використанням швидкорослих рослин *Populus tremula* та *Salix caprea*. Проведено елементний аналіз за допомогою атомно-емісійна мас-спектрометрії. Максимальна концентрація досліджуваних токсичних елементів досягала в умовах ґрунту локації Давидшафт – 2,9 для Cd, 302 Pb і 8978 As мг кг⁻¹, мінімально – на контрольній ділянці. Здійснено аналіз взаємозв'язків показника вологонасиченості ґрунтів із кількістю акумульованих металів у субстраті та у біомасі рослин. Для обох досліджуваних видів інтенсивніше накопичення металів/металоїду виявлено у асиміляційній частині – листках, порівняно із гілками деревних видів. Дослідження підтвердило здатність рослин *Salix caprea* до більш істотного акумулювання токсичних елементів у різних частинах біомаси, у порівнянні із представниками *Populus tremula*. Це визначає перспективу використання представників роду *Salix L.* як потенційних гіперакумуляторів Cd, Pb і As із забруднених ґрунтів та дозволяє коригувати стратегії реагування рослинних об'єктів на стресові умови забруднення потенційно токсичними елементами.

Ключові слова: неесенціальні метали/металоїди, деревні рослини, шахтні відвали, коефіцієнт біоакумуляції.

Goloborodko K.K., Lovinska V.M., Sitnik S.A. Effect of soil saturation on the heavy metal uptake ability of *Salix caprea* and *Populus tremula* on marginal lands

Potentially toxic elements that lead to soil pollution and degradation enter the material cycle and individual links in the food chain. Woody plants often act as a key site for the accumulation of toxicants, removing them from the cycle of substances for a long period of time. However, there are still gaps that could explain the concept of interrelationships and effects of various environmental factors, such as substrate water content and climatic parameters, on the processes of entry and redistribution in plant parts. Many sites are now considered abandoned due to high concentrations of potentially toxic metals. Removal of toxic metals requires the development of environmentally friendly processes for their removal from the cycle of substances. The reaction of plants to elevated concentrations of Cd, Pb and As in soil was studied using the fast-growing plants *Populus tremulae* and *Salix carpea*. Elemental analysis was performed using atomic emission mass spectrometry. The maximum concentration of the studied toxic elements reached 2.9 for Cd, 302 Pb and 8978 As mg·kg⁻¹ in the soil of the Davidshaft location, and the minimum – in the control area. The interrelationships of soil moisture saturation with the amount of accumulated metals in the substrate and in plant biomass were analysed. For both studied species, a more intensive accumulation of metals/metalloids was found in the assimilative part – leaves, compared to branches of woody species. The study confirmed the ability of *Salix caprea* plants to accumulate toxic elements in different parts of the biomass more significantly than *Populus tremula* representatives. This determines the prospect of using representatives of the genus *Salix* L. as potential hyperaccumulators of Cd, Pb and As from contaminated soils and allows adjusting the strategies of plant response to stressful conditions of contamination with potentially toxic elements.

Key words: nonessential metals/metalloids, woody plants, mine dumps, bioaccumulation coefficient.

Постановка проблеми. Водний режим ґрунтів є ключовим компонентом гідрологічного циклу наземних екосистем [1]. Ефективність використання води рослинністю є ключовим індикатором стану екосистеми та основним елементом кругообігу води, вуглецю та енергії в екосистемі [2]. Поверхневий вміст води впливає значним чином на теплообмін, гідрологічні процеси, такі як опади, рівень води у річках, повені й посуху та, головним чином, спричиняє вплив на функціонування рослин [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Показник вмісту вологи у ґрунті використовують для прогнозування змін клімату, погодних умов, оцінювання біопродуктивності рослинних угруповань та врожайності в агросфері [1, 4]. Через кліматичні коливання та антропогенну діяльність, яка насамперед спричиняє засолення ґрунтів й накопичення токсичних концентрацій важких металів, деградація ґрунтів набула широких масштабів [5]. Саме забруднення ґрунтів токсичними елементами стало глобальним екологічним ризиком [6]. Серед металів, які є найбільш впливовими на процес інтоксикації ґрунтів, виділяють кадмій (Cd), Свинець (Pb) і Арсеніум (As) [7]. Поглинання токсичних елементів із ґрунту та довготривале їх утримання у біомасі деревних видів є однією з найбільш ефективних фітореMediaційних технологій [8]. Деревні види рослин, поряд із відомими гіперакумуляторами-травами, показали високі адаптивні ознаки в ґрунтах, забруднення різними металами [9].

Відвал шлаку Давидшахт на східній околиці Фрайберга був побудований у 1944 році та до 1969 року використовувався як хвостосховище для залишків переробки руд. Щоб зменшити вимивання важких металів з тіла відвалу, відвал засипали різними матеріалами після виведення з експлуатації. Відтоді рослинність розвивалася майже безперешкодно. Сьогодні терикон багатий на різні типи біотопів [10].

Метою досліджень стало встановлення біоаккумуляційних особливостей поглинання неесенціальних металів – Pb, Cd As деревними видами у різних умовах зволоження ґрунтів на забруднених територіях.

Постановка завдання. Дослідження були проведено на 20 локаціях, розташованих у Нижній Саксонії, Німеччині. З метою аналізування вхідних даних досліджувані локації об'єднано у п'ять регіонів: ОДШ – околиці Давидшафт, КОЛ – Кольмнітц, ДАВ – Давидшафт, ЗАФ – Зайфердорф та ПЛФ – приміська частина лісу Фрайбергу, прийнята як умовно чиста зона (контроль). відповідно до їхнього місцезнаходження та згідно рівня антропогенного навантаження. Вологонасиченість (ВН) ґрунтів за локаціями був отриманий за оброблення даних із загальнодоступного ресурсу SMAP (Soil Moisture Active Passive). Концентрацію металів/металоїду (Cd, Pb, As) визначали за допомогою приладу ICP-MS (XSeries 2, Thermo Scientific) з використанням 10 мкг·л⁻¹ родію та ренію як внутрішніх стандартів за стандартною методикою [11]. Калібрувальні розчини (0,01–100 мкг·л⁻¹) готували відповідним чином розведення багатоеlementного основного стандартного розчину. Відмінності результатів вмісту елементів у ґрунті та окремих фракціях біомаси рослин визначено за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з наступним тестом HSD Tukey.

Виклад основного матеріалу дослідження. Описова статистика ВН на глибині ґрунту 130 см у різних локаціях представлена в Табл. 1. Вміст ВН є найнижчим для ділянки ДАВ, тоді як найвищі показники даного параметра зафіксовані для території ЗАФ (на 22% вище порівняно із ДАВ) та КОЛ (на 21% вище порівняно із ДАВ).

Таблиця 1

Основні статистики вологонасиченості ґрунтів

Місця відбору	Середнє	Стандартне відхилення	Коефіцієнт варіації	Min	Max	Асиметрія	Експес
КОЛ	0,852 ^a	0,118	13,865	0,643	1,000	-0,059	-5,672
ДАВ	0,676 ^a	0,107	15,949	0,498	0,832	0,678	-5,736
ОДШ	0,766 ^a	0,170	22,223	0,550	1,000	1,555	-6,839
ЗАФ	0,861 ^a	0,116	13,532	0,658	1,000	-0,814	-5,633
ПЛФ	0,716 ^a	0,137	19,205	0,501	0,921	1,320	-6,053

Результати Тьюкі-аналізу показали гомогенність аналізуємих груп відносно усіх проаналізованих locations. Дані, отримані за цим методом, не є статистично значущими ($p=0,062$).

Результати аналізу концентрації важких металів за досліджуваними локаціями представлений у табл. 2. Середній вміст досліджуваних елементів можна розмістити у наступному порядку As>Pb>Cd.

Таблиця 2

Основні статистики для металів та металоїду, мг·кг⁻¹

Локації	Середнє	Стандартне відхилення	Коефіцієнт варіації	Min	Max
<i>Cd</i>					
ПЛФ	3,52 ^{a*}	0,36	95,43	1,09	7,36
КОЛ	2,51	0,53	21,28	1,98	3,05
ДАВ	2,96 ^{a*}	0,80	61,16	1,47	4,97
ОДШ	1,78	0,47	26,63	1,31	2,26

Продовження таблиці 2

ЗАФ	0,69 ^{b*}	0,18	26,56	0,41	1,07
<i>Pb</i>					
ПЛФ	133,27	15,70	41,79	95,74	197,27
КОЛ	92,30	8,75	14,89	78,55	106,04
ДАВ	301,76	23,62	78,08	104,57	562,7
ОДШ	328,03	29,06	88,42	37,97	618,1
ЗАФ	37,71	3,565	30,66	16,67	55,58
<i>As</i>					
ПЛФ	63,08	4,379	22,79	46,51	72,24
КОЛ	111,36 ^{b*}	12,41	29,10	78,95	143,77
ДАВ	8978,27 ^{a*}	509,0	139,32	52,55	23276,0
ОДШ	99,81 ^{b*}	6,68	66,81	33,04	166,4
ЗАФ	39,16 ^{b*}	4,97	117,39	14,17	159,42

Примітка: * статистично значуща різниця на рівні $p < 0,05$.

Цікаво, що вміст Cd виявився найвищим для контрольної ділянки, де фіксується перевищення даного металу, порівняно із ділянкою із найнижчим його вмістом у ЗАФ майже у 20 разів. Відповідно до встановлених коефіцієнтів варіації, на таких локаціях як КОЛ, ОДШ та ЗАФ виявлена менша варіабельність кадмію, у порівнянні із ДАВ, а особливо у порівнянні із ПЛФ.

Для іншого досліджуваного металу – Pb – подібної тенденції змін відносно ділянок не встановлено. Так, найвищий рівень цього металу продемонстровано для ОДШ та ДАВ, тоді як у ґрунтах ЗАФ відмічена повторно (як і для кадмію), найнижча його кількість.

Відносно накопичення миш'яку у досліджуваних субстратах, то очікувано найвищим вмістом цього токсиканту відрізнялась ділянка ДАВ, із перевищенням цього металу, порівняно із ПЛФ та ЗАФ, у 162 та 230 разів. Коефіцієнт варіабельності змін концентрації металу є найнижчим для таких локацій як ПЛФ, КОЛ, найвищою – для ділянки ДАВ. За результатами статистичної оцінки встановлено, що важкі метали мають нормальний розподіл на 95% рівні достовірності для усіх досліджуваних ділянок. За результатами оцінювання гомогенності досліджуваних груп шляхом аналізу варіант (ANOVA) та Тьюкі-тестом, доведено достовірність отриманих даних ($p < 0,05$) для As та частково – для Cd. У свою чергу для Pb дана тенденція підтверджена не була.

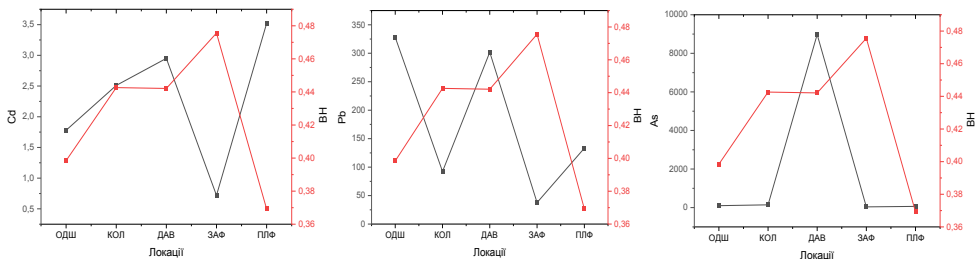


Рис. 1. Взаємозв'язок вологонасиченості та вмісту металів/металоїдів на різних дослідних ділянках

Результати взаємозв'язків між ВН ґрунтів та акумульованих у субстраті важких металів залежно від локацій представлено на рис. Як видно із наведених результатів, для кадмію при мінімальному вмісті води спостерігалось максимальне накопичення цього токсиканту (рис. 1).

Для іншого досліджуваного металу, As, у порівнянні із Cd, встановлена протилежна тенденція його акумулювання у найменшій кількості за умов мінімальної ВН. Це чітко визначено для контрольної ділянки. У випадку аналізування свинцю подібна тенденція не прослідковується.

Концентрації Cd, Pb, і As для двох досліджуваних порід значно варіювали у межах локацій (табл. 3). За результатами Тьюкі-тесту встановлено, що середні концентрації Cd виявилися вищими за такі для Pb та As (Cd > Pb > As).

Таблиця 3

Вміст неесенціальних елементів у різних компартментах рослин, мг·кг⁻¹

Me	Рід	Компартмент	Вміст (середнє ± стандартне відхилення)				
			ПЛФ	КОЛ	ДАВ	ОДШ	ЗАФ
Cd	Salix	leaves	1.71±2.46	10.7±3.35*	35.6*±0.5	11.1±3.53	4.08±1.59*
		branches	1.39±1.60	3.98±0.28*	15.7±0.51*	5.31±1.01	2.11±0.63*
	Populus	leaves	4.22±3.13	5.79±3.56	10.9±0.5*	8.44±0.22	3.38±2.67*
		branches	2.58±1.46	2.72±0.71	8.52±0.2*	5.18±2.33	1.29±0.78*
Pb	Salix	leaves	0.82±0.12	1.08±0.07*	3.59±0.3*	4.21±0.20	0.87±0.32*
		branches	0.75±0.61	0.23±0.05*	1.75±0.10*	0.79±0.09	0.11±0.01*
	Populus	leaves	1.28±0.64	0.55±0.14*	2.54±0.1*	2.97±0.29	0.66±0.06*
		branches	1.90±0.60	0.25±0.09*	1.03±0.04*	1.05±0.85	0.15±0.05*
As	Salix	leaves	0.55±0.77	0.30±0.12	1.18±0.05	1.39±0.32*	0.35±0.01
		branches	0.38±0.36	0.36±0.30	1.12±0.23	0.29±0.03*	0.17±0.01
	Populus	leaves	0.26±0.15	0.17±0.06	0.79±0.01*	0.71±0.29	0.24±0.07
		branches	0.41±0.04	0.42±0.05	0.53±0.05*	0.67±0.25	0.37±0.09

Примітка: * статистично достовірні результати на рівні P < 0,05.

Порівняння біоаккумулятивної здатності досліджуваних видів відповідно до визначених локацій виявило найбільш інтенсивне накопичення токсикантів у районі ДАВ та ОДШ. Фактично у всіх варіантах фіксується перевищення рівнів концентрації Cd та Pb порівняно із максимально дозволеними концентраціями відповідно до FAO/WHO (Cd – 0,2 мг·кг⁻¹, Pb – 0,3 мг·кг⁻¹) [12]. Зафіксовано вищий вміст кадмію у біомасі рослин верби у 1,20–2,63 рази. Як для верби, так і для тополі листки накопичують Cd більш інтенсивно, порівняно із деревиною приблизно у два рази, що простежується фактично на усіх локаціях. Вміст Pb був значно нижчим, у порівнянні із Cd, на усіх досліджуваних локаціях. Подібні до отриманих нами результатів, залежності встановлено у роботах Кашема і Сінга [13]. Отримані результати зменшення концентрації металів з паралельним затопленням ґрунтів автори пов'язують зі змінами рН та окисно-відновного потенціалу та існування Mn, Fe, N, S в аеробних умовах в окисидативних формах, які опосередковано впливають на підвищення значень окисно-відновного потенціалу, а гідратовані оксиди Mn і Fe іммобілізують важкі метали, забезпечуючи місця для їх сорбції у більшості ґрунтів.

Акумулятивні властивості верби виявились вищими, у порівнянні із тополем у 1,14–1,66 рази на усіх локаціях, окрім контрольної ділянки, де простежувалась обернена тенденція реакції видів.

Відносно третього досліджуваного металу, то треба зазначити, що у порівнянні із тими даними, які було отримано для ґрунтових сумішей, то рівень вмісту As у рослинних об'єктах є вкрай низьким. Так, біомаса верби накопичувала As залежно від місцерозміщення об'єкту у кількості від 0,66 (КОЛ) до максимум 2,3 мг·кг⁻¹ сухої речовини даного токсиканту на ділянці ДАВ. Щодо іншого досліджуваного виду, то для тополі виявлено дещо вужчий діапазон змін вмісту арсеніуму – від 0,59 (КОЛ) до 1,38 (ОДШ) мг/кг. Подібно до результатів, отриманих для плумбуму та свинцю, показано, що біомаса верби має вищі акумулятивні властивості відносно миш'яку, у порівнянні із тополею. Однак, перевищення показників вмісту металу на різних локаціях є незначним та суттєво відрізняється лише в умовах ДАВ, де фіксується перевищення вмісту свинцю у біомасі верби майже у 2 рази. На відміну від попередніх двох видів металів, для арсеніку перевищення вмісту металу у тополі виявлено лише в умовах ЗАФ, на всіх інших ділянках – у біомасі верби.

Висновки і пропозиції. Вологонасиченість ґрунтів супроводжувалась зниженням неесенціальних елементів у ґрунтах досліджуваного регіону. Дослідження виявили різну реакцію деревних видів на техногенне навантаження ґрунту: представники роду *Salix* мали вищу акумулятивну здатність, порівняно з *Populus*. Концентрація кадмію була максимальною на всіх локаціях, як у біомасі листя, так і гілок. Досліджувані деревні види можна віднести до рослин, що накопичують кадмій. По відношенню до миш'яку та свинцю вербу та тополі можна віднести до адсорбентів металу. Результати визначення потенційної здатності досліджуваних видів поглинати метали та металоїди з субстрату та накопичувати їх у надземній біомасі, може бути використано в технологіях фітоекстракції поллютантів на забруднених територіях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Томільцева А.І., Яцик А.В., Мокін В.Б. Екологічні основи управління водними ресурсами : навч. посіб. Київ, 2017. 200 с.
2. McColl K.A., Alemohammad S.H., Akbar R., Konings A.G., Yueh S., Entekhabi D. The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geoscience*. 2017. Vol. 10. P. 100–104.
3. Bauke S.L., Amelung W., Bol R., Brandt L., Brüggemann N., Kandeler E., Meyer N., Or D., Schnepf A., Schloter M., Schulz S., Siebers N., Sperber Ch., Vereecken H. Soil water status shapes nutrient cycling in agroecosystems from micrometer to landscape scales. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2022. Vol. 185. № 6. P. 773–792.
4. Belleflamme A., Goergen K., Wagner N., Kollet S., Bathiany S., El Zohbi J., Rechid D., Vanderborght J., Vereecken H. Hydrological forecasting at impact scale: the integrated ParFlow hydrological model at 0.6 km for climate resilient water resource management over Germany. *Front. Water*. 2023. Vol. 5. P. 1183642.
5. Бреславець А.І. Техногенно забруднені ґрунти та шляхи їх поліпшення. Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки: збірник наукових праць. 2009. № 31. С. 189–202.
6. Khan S., Naushad Mu, Lima E.C., Zhang S., Shaheen S.M., Rinklebe J. Global soil pollution by toxic elements: current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies – a review. *J Hazard Mater*. 2021. Vol. 417. P.126039.
7. Гришко В.М. Важкі метали: надходження в ґрунти, транслокація у рослинах та екологічна безпека. Донецьк : Донбас, 2012. 304 с.

8. Кузьменко Є.І., Кузьменко А.С. Оцінка фітотоксичності важких металів в умовах моно- і поліелементного забруднення ґрунту. *Агроекологічний журнал*. 2013. № 1. С. 33–35.

9. Zverkovskyy V., Sytnyk S., Lovynska, V. Kharytonov M., Lakyda I., Mykolenko S., Pardini G., Margui E., Gispert M. Remediation potential of forest forming tree species within northern steppe reclamation stands. 2018. *Ekológia (Bratislava)*. Vol. 37. № 1. P. 69–81.

10. Wiche O., Zertani V., Hentschel W., Achtziger R., Midula P. Germanium and rare earth elements in topsoil and soil-grown plants on different land use types in the mining area of Freiberg (Germany). 2017. *Journal of Geochemical Exploration*. Vol. 175. P. 120–129.

11. Alfassi Z., Wai C. M. *Preconcentration techniques for trace elements*. United States, 1991. 238 p.

12. World Health Organisation (WHO), Report of 33rd meeting, Joint FAO/WHO Joint Expert Committee on Food Additives, Toxicological evaluation of certain food additives and contaminants. 1989. № 24, International Programme on Chemical Safety, WHO, Geneva.

13. Kashem M. A., Singh B. R., Kondo T., Imamul Huq S. M., Kawai S. Comparison of extractability of Cd, Cu, Pb and Zn with sequential extraction in contaminated and non-contaminated soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2007. Vol. 4. № 2. P. 169–176.

УДК 631.41:631.67 (477.7)

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.39>

ЗАСОЛЕНІСТЬ ЧОРНОЗЕМІВ ЗАДНІСТЕР'Я ОДЕЩИНИ

Тортик М.І. – к.географ.н., доцент,

професор кафедри географії України, ґрунтознавства та земельного кадастру,
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

Буяновський А.О. – к.географ.н., доцент,

завідувач кафедри географії України, ґрунтознавства та земельного кадастру,
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

Ожован О.О. – к.б.н., доцент,

доцент кафедри географії України, ґрунтознавства та земельного кадастру,
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

Проведено вивчення особливостей характеру засоленості чорноземів Задністер'я Одещини в різних агроеліоративних умовах, а саме: різної інтенсивності зрошення водами різної іригаційної якості та незрошуваних ґрунтових аналогів. За результатами досліджень автоморфних ґрунтів території встановлено, що вміст водорозчинних солей в гумусованій частині профілю зазвичай складає 0,04–0,05% від ваги ґрунту. В карбонатній частині профілю (50–150 см) автоморфних богарних ґрунтів характерне незначне зростання вмісту водорозчинних солей, як правило, до 0,06–0,08% від ваги ґрунту. У відповідності до існуючої класифікації ґрунтів за ступенем засолення в залежності від хімізму солей незрошувані чорноземи південні досліджуваної території є незасоленими.

Зрошення чорноземів південних безпосередньо дунайськими прісними гідрокарбонатно-кальцієвими водами мінералізацією близько 0,5 г/дм³ на протязі 29 років не призвело
