



Биолог. журн. Армении, 3 (71), 2019

ՖԻՏՈՌԵՄԵԴԻԱՑԻԱՆ ՈՐՊԵՍ ԾԱՆՐ ՄԵՏԱՂՆԵՐՈՎ ՀՈՂԵՐԻ ԱՐՏՈՏՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱԶԵՑՄԱՆ ԿԵՆՍԱՏԵՆՈՒՈՒԳԻԱ

Ռ.Է. ԽԱԶԱՏՐՅԱՆ¹, Կ.Ա. ՂԱԶԱՐՅԱՆ², Ջ.Ս. ՄՈՎՍԵՅԱՆ²

¹ Հայաստանի ազգային ագրարային համալսարան, hkhachatryan84@gmail.com

² Երևանի պետական համալսարան, kghazaryan@ysu.am, hasmikmov@ysu.am

Հոդվածում ամփոփված են ծանր մետաղներով աղտոտված հողերի ֆիտորեմեդիացման վերաբերյալ առկա միջազգային փորձն ու բազմաթիվ հետազոտությունների արդյունքները: Նկարագրված են ֆիտորեմեդիացիայի տարբեր մեթոդների առանձնահատկություններն ու դրանց կիրառման հնարավորությունները: Նշվում է նաև ֆիտորեմեդիացիայի գործընթացի հեռանկարի ու ապագա միտումների մասին:

Ծանր մետաղներ – ֆիտորեմեդիացում – ֆիտոէքստրակցում – գերկուտակող բուսատեսակներ

В статье обобщены международный опыт фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами, а также результаты многочисленных исследований. Описаны особенности различных методов фиторемедиации и возможности их применения. Обсуждаются перспективы процесса фиторемедиации и связанные с ним тенденции.

Тяжелые металлы – фиторемедиация – фитоэкстракция – гипераккумулирующие растения

The international experience concerning heavy metal polluted soils phytoremediation and the results of numerous studies are summarized. The peculiarities of the different methods of phytoremediation and the possibilities of their application are described. The perspectives of the process of phytoremediation and connected future trends are also mentioned.

Heavy metals – phytoremediation – phytoextraction – hyperaccumulating plant species

Ֆիտորեմեդիացիան կենսատեխնոլոգիական մի գործընթաց է, որի ժամանակ օգտագործելով բույսերի գենետիկ ներուժը, հնարավոր է լինում շրջակա միջավայրի բաղադրամասերում նվազեցնել աղտոտիչ նյութերի պարունակությունը կամ տոթսիկ ազդեցությունը: Այն կարելի է կիրառել ծանր մետաղների ու ռադիոնուկլիդների, ինչպես նաև օրգանական աղտոտիչների (օրինակ՝ պոլիցիկլիկ արոմատիկ ածխաջրածիններ, պոլիքլորացված բիֆենիլներ, թունաքիմիկատներ և այլն) հեռացման նպատակով [7, 18]:

Ֆիտորեմեդիացիա տերմինը կազմված է երկու բառից՝ «ֆիտո», որը հունարեն նշանակում է բույս, իսկ «ռեմեդիացիա» լատիներենից թարգմանաբար արտահայտում է ուղղելու կամ վտանգը չեզոքացնելու հմաստ: Բազմաթիվ բուսատեսակներ օժտված են շրջակա միջավայրի բաղադրամասերից տարբեր աղտոտիչներ կլանելու հատկությամբ ու թունագերծելու մեխանիզմներով: Ֆիտորեմեդիացիայի կենսատեխնոլոգիական գործընթացը շրջակա բնական միջավայրի էկոլոգիական վիճակի բարելավման գործում հանդիսանում է համեմատաբար նոր ուղղություն, որը կիրառվում է վերջին երեք տասնամյակների ընթացքում:

Ֆիտոռեմեդիացիա (ինչպես նաև ֆիտոէստրակցիա) հասկացությունը 1983 թ. առաջարկվել է Չեյնի կողմից, որը գիտական հանրության կողմից ընդունվել ու լայն ճանաչում է ստացել [6]: Ֆիտոռեմեդիացիայի իրականացումը համեմատած մյուս միջոցառումների հետ ավելի դյուրին է և քիչ ծախսատար: Այն հարմար է կիրառել մեծ տարածքների բարելավման համար, որտեղ գոյություն ունեցող մյուս մեթոդները գործնականորեն բարդ են և տնտեսապես ոչ ձեռնասու: Երբեմն ֆիտոռեմեդիացիայի իրականացման ծախսատարությունը կարող է գոյություն ունեցող մյուս մեթոդների կիրառման ֆինանսական արժեքի 5 %-ից պակաս լինել: Աղտոտված հողատարածքների կանաչապատումը կանխում է էրոզիոն գործընթացներն ու մետաղների տարալվացման վտանգը: Այսպիսով, Էկոլոգիական տեսակետից անվտանգ, տնտեսապես արդյունավետ և գործնականում հեշտ իրականացվող այս միջոցառումը շրջակա բնական միջավայրի Էկոլոգիական վիճակի բարելավման գործում ունի մեծ հեռանկար: Բացի դրանից, արագ աճող և մեծ վերգետնյա կենսազանգված առաջացնող բուսատեսակները, ինչպիսիք են ուռենին, բարդին և յատրոֆան, կարելի է օգտագործել ֆիտոռեմեդիացիայի և Էներգիայի արտադրության համար [1]:

Աղյուսակ 1. Ֆիտոռեմեդիացիայի տարբեր մեթոդների համառոտ նկարագրությունը

Մեթոդ	Նկարագրություն
1) ֆիտոէստրակցիա	Աղտոտիչ նյութերի կուտակում բույսերի կանաչ կենսազանգվածում և ճյուղերում
2) ֆիտոֆիլտրացիա	Աղտոտված ջրից աղտոտիչների հեռացում բույսերի միջոցով:
3) ֆիտոստաբիլիզացիա	Բույսերի արմատային համակարգի կողմից հողում աղտոտիչ նյութերի շարժունակության ու մատչելիության սահմանափակում
4) ֆիտոլվատիլիզացիա	Աղտոտիչ նյութերի փոխակերպում անկայուն (ցնդող) ձևերի ու դրանց հետագա արձակում մթնոլորտ:
5) ֆիտոդեգրադացիա	Բույսերի հյուսվածքներում ֆերմենտների ազդեցությամբ օրգանական բյուրեղիկների կենսաքայքայում:
6) ռիզոդեգրադացիա	Հողի արմատաբնակ մանրէների ազդեցությամբ օրգանական բյուրեղիկների քայքայում:
7) ֆիտոդետալիզացիա	Աղակալած հողից ավելորդ աղերի հեռացում աղասեր (աղադիմացկուն) բույսերի միջոցով

Ֆիտոէստրակցիան (հայտնի է նաև ֆիտոակումուլյացիա և ֆիտոաքսորեցիա անվանումներով) հիմնված է տրանսլոկացիոն գործընթացի վրա, որի ժամանակ հողից կամ ջրից բույսի արմատների կողմից կլանվում են աղտոտիչ նյութեր և կուտակվում վերգետնյա կենսազանգվածում: Ֆիտոէստրակցիայի տեսանկյունից աղտոտիչների տրանսլոկացիան դեպի բույսի վերգետնյա մաս կարևոր կենսաքիմիական գործընթաց է, բանի որ ստորգետնյա (արմատային) կենսազանգվածի բերքահավաք, որպես կանոն հնարավոր չէ [24]:

Ֆիտոֆիլտրացիան բույսերի միջոցով աղտոտված մակերեսային ու թափոնային հոսքաջրերից աղտոտիչ նյութերի հեռացումն է: Այս դեպքում աղտոտիչները քսորեցվում կամ աղտորեցվում են բույսի արմատների, վերգետնյա կանաչ զանգվածի ու ցողունի կողմից: Արդյունքում աղտոտիչների պարունակությունը նվազում է, իսկ գրունտային ջրերում դրանց շարժումը հասնում նվազագույնի:

Ֆիտոստաբիլիզացիան (ֆիտոհիմոբիլիզացիա) որոշակի բուսատեսակների միջոցով աղտոտված հողում աղտոտիչների կայունացնելն է: Այս մեթոդի կիրառման դեպքում նվազում է շրջակա միջավայրում աղտոտիչների շարժունակությունն ու մատչելիությունը, հետևաբար կանխվում է դրանց միգրացիան դեպի գրունտային ջրեր ու ներթափանցումը սննդային շղթա: Բույսերը կարող են հողի արմատաբնակ շերտում ծանր մետաղների բացասական ազդեցությունը չեզոքացնել արմատների կողմից սորբցիայի, նստվածքների ու համալիր միացությունների առաջացման կամ մետաղների վալենտականության նվազեցման միջոցով: Ծանր մետաղները տարբեր վալենտականության դեպքում ցուցաբերում են տարբեր տոքսիկություն: Բույսերը տարբեր օքսիդավերականգնող ֆերմենտների ազդեցության ներքո ընդունակ են ծանր մետաղների տոքսիկ ազդեցությունը համեմատաբար նվազեցնել: Օրինակ՝ պարզված է, որ եռավալենտ քրոմը /Cr (III)/ ցուցաբերում է ավելի քիչ շարժունակություն ու տոքսիկություն, քան վեցավալենտ քրոմը /Cr (VI)/ [29]:

Ֆիտոստաբիլիզացիայի գործընթացում ծանր մետաղները կուտակվում են կենսոլյոսում, որի արդյունքում դրանց լվացումն ու գրունտային ջրերի մեջ ներթափանցումը հասնում է նվազագույնի: Ուշագրավ է այն, որ սա խնդրի վերջնական լուծում չի հանդիսանում, քանի որ ծանր մետաղները այնուամենայնիվ մնում են հողում: Այս մեթոդի կիրառման դեպքում սահմանափակվում է ծանր մետաղների շարժունակությունն ու միգրացիոն ընդունակությունը՝ հնարավորինս կառավարելի դարձնելով այդ վտանգավոր աղտոտիչների բացասական ազդեցությունները:

Ֆիտոլուատիլիզացիայի գործընթացում աղտոտիչ նյութերը բույսերի միջոցով կլանվելով հողից, փոխակերպվում են անկայուն (ցնդող) ձևերի, ապա արտազատվում մթնոլորտ: Այս մեթոդը կարող է օգտագործվել օրգանական աղտոտիչների և որոշ ծանր մետաղների, մասնավորապես սնդիկի (Hg) և սելենի (Se) հեռացման նպատակով: Պետք է նշել, որ ֆիտոռեմեդիացիայի այս մեթոդի կիրառումը վիճահարույց է, քանի որ աղտոտիչ նյութերը շրջակա միջավայրի մի բաղադրամասից (հող) տեղափոխվում են մեկ այլ բաղադրամաս (մթնոլորտ): Ելնելով այս հանգամանքից՝ ֆիտոլուատիլիզացիան գործնականում լայն կիրառություն չունի:

Ֆիտոդեգրադացիան օրգանական աղտոտիչների կենսաբալթայման գործընթաց է, որը տեղի է ունենում բուսական օրգանիզմում պարունակվող ֆերմենտների միջոցով, ինչպիսիք են դեհալոգենազան ու օքսիդենազան [27]: Որոշ բուսատեսակներ աղտոտված միջավայրից ընդունակ են կլանելու օրգանական քսենոբիոտիկներ, այնուհետև դրանց բացասական ազդեցությունները չեզոքացնել: Այս տեսանկյունից մի շարք բուսատեսակներ կենսոլորտում ակտիվ մասնակցություն ունեն ինքնամաքման գործընթացներին:

Ուշագրավ է, որ ֆիտոդեգրադացիայի գործընթացը սահմանափակվում է միայն օրգանական աղտոտիչների ազդեցության չեզոքացմամբ, քանի որ ծանր մետաղները կենսաբալթայման չեն ենթարկվում:

Չետազոտություններով հաստատված է, որ ֆիտոռեմեդիացիայի այս մեթոդը նպատակահարմար է կիրառել բազմաթիվ օրգանական աղտոտիչների, այդ թվում սինթետիկ հերբիցիդների ու ինսեկտիցիդների կենսաբալթայման համար: Հայտնի է, որ գենետիկորեն ձևափոխված որոշ բույսեր, օրինակ՝ տրանսգենային բարդիները, օգտագործվում են հիշյալ նպատակի համար [9]:

Ռիզոդեգրադացիան հողի արմատաբնակ շերտում մանրէների ազդեցությամբ օրգանական աղտոտիչների քայքայումն է: Հողում ռիզոսֆերան տարածվում է արմատների շուրջը մինչև 1 մ և գտնվում է բույսերի անմիջական ազդեցության ներքո [38]: Ռիզոդեգրադացիայի գործընթացում ռիզոսֆերայում տեղի է ունենում աղտոտիչ նյութերի ինտենսիվ քայքայում, որը պայմանավորված է մանրէների մեծ քանակությամբ ու միկրոկենսաբանական բարձր ակտիվությամբ: Ռիզոսֆերայում բույսերի արմատները արտազատելով ածխաջրեր, ամինաթթուներ ու ֆլավոնոիդներ խթանում են միկրոկենսաբանական ակտիվությունը 10-100 անգամ: Հողային միջավայրում արմատների կողմից արտազատված նյութերը ապահովում են մանրէների համար հարուստ սննդային միջավայր, հանդիսանալով ածխածնի ու ազոտի աղբյուր: Միաժամանակ բույսերի արմատները արտազատում են որոշակի ֆերմենտներ, որոնք ընդունակ են հողում քայքայել օրգանական աղտոտիչ նյութեր [17]:

Ֆիտոդեսալինիզացիան հալոֆիտ (աղասեր, աղադիմացկուն) բույսերի միջոցով աղակալած հողից ավելորդ աղերի հեռացումն է: Այս դեպքում հողում մնում է աղերի այն պարունակությունը, որը նպաստավոր է մշակաբույսերի աճին ու զարգացմանը: Օրինակ՝ սվեդա (*Suaeda maritima*) և ծովային դանդուռ (*Sesuvium portulacastrum*) հալոֆիտ բուսատեսակները կարող են մեկ հեկտար աղակալած հողատարածքից չորս ամսվա ընթացքում հեռացնել համապատասխանաբար 504 և 474 կգ նատրիումի քլորիդ: Փաստորեն, *S. maritima* և *S. portulacastrum* բուսատեսակները նպատակահարմար է օգտագործել ուժեղ աղակալած հողերում NaCl-ի հեռացման համար և դրանց մի քանի անգամ մշակության ու բերքահավաքից հետո աղազերծված հողատարածքները կարելի է օգտագործել գյուղատնտեսական մշակաբույսերի աճեցման նպատակով [21]:

Աղտոտված հողից, հատակային նստվածքներից կամ ջրից ծանր մետաղների ու մետալոիդների հեռացման նպատակով իրականացվող ֆիտոդեքստրակցիան հանդիսանում է ֆիտոռեմեդիացիայի հիմնական ու ամենարդյունավետ մեթոդը:

Այն միաժամանակ հեռանկարային ու տնտեսապես շահավետ մեթոդ է, որը ամբողջ աշխարհում ունի գիտագործնական մեծ կիրառություն: Ֆիտոէստրակցիայի արդյունավետությունը կախված է մի շարք գործոններից, որոնցից են հողում ծանր մետաղների շարժունակությունը (մատչելիությունը), հողի հատկությունները, ծանր մետաղների ու օգտագործվող բույսերի տեսակները և այլն:

Բուսատեսակները, որոնք պիտանի են ֆիտոէստրակցիայի գործընթացում օգտագործելու համար, պետք է ունենան հետևյալ բնութագրական ցուցանիշները [11, 13, 25].

- ա) արագ աճեցողություն,
- բ) վերգետնյա մեծ կենսազանգված առաջացնելու ընդունակություն,
- գ) արմատային հզոր համակարգ առաջացնելու ընդունակություն,
- դ) հողից ծանր մետաղների թիրախային տեսակների շատ կուտակման ընդունակություն,
- ե) արմատային համակարգից դեպի վերգետնյա կենսազանգված ծանր մետաղների տրանսլոկացիոն ընդունակություն,
- զ) թիրախային ծանր մետաղների տոքսիկ ազդեցության նկատմամբ տոլերանտություն (դիմացկունություն),
- է) առկա էկոլոգիական ու կլիմայական պայմաններին լավ հարմարվողականություն,
- ը) հիվանդությունների հարուցիչների ու վնասատուների նկատմամբ կայունություն,
- թ) մշակության ու բերքահավաքի մատչելիություն,
- ժ) խոտակեր կենդանիների սնվելու համար ոչ պիտանի, ինչը անհրաժեշտ պայման է սննդային շղթա աղտոտիչների ներթափանցումից խուսափելու համար:

Ֆիտոէստրակցիայի նպատակով օգտագործվող բույսերի տեսակների գենետիկական ներուժը գնահատվում է՝ հաշվի առնելով երկու հիմնական գործոն՝ բույսում կուտակված մետաղների քանակությունը և բույսի առաջացրած կանաչ կենսազանգվածի քանակը [10, 12]:

Այս տեսանկյունից բուսատեսակները բաժանվում են երկու խմբի՝

1) գերկուտակողներ, այսինքն կուտակում են մեծ քանակությամբ ծանր մետաղների թիրախային տեսակներ, սակայն առաջացնում են համեմատաբար քիչ վերգետնյա կենսազանգված,

2) բուսատեսակներ (օրինակ՝ հնդկական մանանեխը), որոնք համեմատաբար գերկուտակողների, թիրախային ծանր մետաղներ քիչ են կուտակում, սակայն առաջացնում են մեծ քանակությամբ վերգետնյա կենսազանգված [22]:

Բույսերի կողմից ծանր մետաղների նպատակային գերկուտակումը համեմատելի է վերգետնյա մեծ կենսազանգվածի առաջացման ընդունակության հետ: Սակայն կարծիք, որ ֆիտոռեմեդիացիայի համար ավելի կարևոր է բույսի գերկուտակման ունակությունը, քան մեծ քանակությամբ վերգետնյա կենսազանգված առաջացնելը: Վերջինս մեկնաբանվում է նրանով, որ ծանր մետաղների գերկուտակման ու համեմատաբար քիչ կենսազանգվածի առաջացման դեպքում ծախսատարությունն ու աշխատատարությունը ավելի պակաս է լինում, քան շատ կենսազանգվածի առաջացման ու ծանր մետաղների քիչ կուտակման դեպքում:

Այն բուսատեսակները, (օրինակ՝ երեքնուկը (*Trifolium spp.*)), որոնք ընդունակ են մեկ վեգետացիայի ընթացքում ապահովել կանաչ կենսազանգվածի մի քանի բերք, ծանր մետաղների ֆիտոէստրակցիայի համար ունեն մեծ կիրառական նշանակություն: Այս տեսանկյունից խոտաբույսերը ավելի նախընտրելի են, քան թփերը կամ ծառերը [2]:

Ծանր մետաղների ֆիտոէստրակցիայի նպատակով օգտագործվում են նաև մշակաբույսեր՝ եգիպտացորեն, գարի և այլն: Այս դեպքում մի քանի անգամ մշակության և վերգետնյա կանաչ կենսազանգվածի հնձման ու հեռացման միջոցով հնարավոր է լինում հողում ծանր մետաղների պարունակությունը նվազեցնել թույլատրելի մակարդակի: Սակայն մշակաբույսերի օգտագործումը ունի որոշակի թերություն, որը պայմանավորված է աղտոտիչների սննդային շղթա ներթափանցման վտանգի հետ: Հետևաբար, ֆիտոռեմեդիացիայի նպատակով կիրառվող մշակաբույսերը, որպես կանոն, պիտանի չեն անասնակերի կամ մարդու սննդի մեջ օգտագործելու համար [14]:

Գերկուտակող են համարվում այն բուսատեսակները, որոնք միավոր վերգետնյա կենսազանգվածում կուտակում են ծանր մետաղների այնքան քանակություն, որը զգալիորեն գերազանցում է միավոր հողում դրանց պարունակությանը [19]: Գերկուտակող (հիպերակուումյատոր) տերմինը առաջին անգամ օգտագործել է Բրուկսը [4], ով բնութագրել է բույսը, որը պարունակել է նիկել ավելի քան 1000 մգ/կգ կամ չոր զանգվածի 0,1 %-ը: Բուսատեսակին գերկուտակող բնորոշում տալու համար պետք է հաշվի առնել միայն վերգետնյա կանաչ կենսազանգվածում (ֆոտոսինթետիկ մակերես) ծանր մետաղներ կուտակելու ունակությունը: Բազմաթիվ հետազոտությունների ու միջազգային պրակտիկայի համաձայն գերկուտակող բուսատեսակները որպես կանոն պետք է կուտակեն չոր զանգվածում ավելի քան 100 մգ/կգ Cd, 1000 մգ/կգ և ավելի Ni, Cu ու Pb, կամ ոչ պակաս քան 10000 մգ/կգ Zn և Mn, երբ դրանք աճում են տվյալ մետաղներով հարուստ հողերում [26]: Ընդհանրապես հայտնի է, որ գերկուտակող բույսերը 100 և ավելի անգամ շատ են կուտակում ծանր մետաղներ, համեմատած մշակաբույսերի կամ սովորական բուսատեսակների, առանց կենսազանգվածի կրճատման: Գերկուտակող բուսատեսակների դեպքում վերգետնյա և ստորգետնյա (արմատային համակարգ) կենսազանգվածներում ծանր մետաղների կուտակման հարաբերակցությունը, այսպես կոչված տրանսլոկացիոն գործակիցը՝ (SQ), մեկից բարձր է: Սակայն, միայն SQ-ն չի կարող օգտագործվել գերկուտակման ունակության պարզաբանման համար, այն կարող է հանդիսանալ լրացուցիչ ցուցանիշ [26]:

Գրականության տվյալների համաձայն 400-ից ավելի բուսատեսակներ հայտնի են որպես մետաղ-գերկուտակողներ, որոնցից ավելի քան 300-ը Ni-գերկուտակողներ են: Հայտնի են նաև 16 Zn-գերկուտակող բուսատեսակներ, որոնք ընդունակ են վերգետնյա չոր զանգվածում կուտակել ավելի քան 10000 մգ/կգ քանակություն: Օրինակ, բույսերի *Brassicaceae* ընտանիքը ներառում է մետաղ-գերկուտակող բազմաթիվ տեսակներ [5]:

Մետաղ-գերկուտակող բույսերը կարելի է օգտագործել ինչպես տոքսիկ ու վտանգավոր ծանր մետաղների ֆիտոռեմեդիացիայի, այնպես էլ թանկարժեք մետաղների (Au, Pd, Pt) ֆիտոարդյունահանման նպատակով: Վերջինիս դեպքում ստացված թանկարժեք մետաղները իրենցից զգալի տնտեսական արժեք են ներկայացնում, ինչը կարող է որոշ չափով մեղմել հողի ֆիտոռեմեդիացիայի նպատակով կատարվող ծախսերը [5]:

Որոշ բուսատեսակներ, ունենալով կոնկրետ ծանր մետաղների գերկուտակման ընդունակություն, հայտնի են որպես բնական մետաղ-գերկուտակողներ: Մյուս կողմից, որոշ բուսատեսակների կոնկրետ ծանր մետաղների կուտակման ընդունակությունը կարելի է մեծացնել գենետիկական մոդիֆիկացիայի միջոցով, գենային ինժեներիայի կիրառմամբ: Համաշխարհային պրակտիկայում որոշ ծանր մետաղների ֆիտոռեմեդիացիայի նպատակով գենետիկորեն մոդիֆիկացված (ձևափոխված) բուսատեսակների կիրառումը ցուցաբերել է խոստումնալից արդյունքներ: Հակառակ դրան, Էկոլոգ գիտնականների մի ստվար զանգված գենետիկորեն մոդիֆիկացված (ձևափոխված) օրգանիզմների Էկոլոգիական վտանգի վերաբերյալ հայտնում են իրենց մտահոգությունը:

Ֆիտոքստրակցիայի արդյունավետությունը կարելի է որոշել կենսակուտակման ու տրանսլոկացիոն գործակիցների քանակական հաշվարկի միջոցով: Այս դեպքում կենսակուտակման գործակիցը ցույց է տալիս ընտրված բուսատեսակի արդյունավետությունը, որը շրջակա միջավայրից իր հյուսվածքներում կուտակում է ծանր մետաղներ:

$$\text{Կենսակուտակման գործակից(ԿԿԳ)} = \frac{\text{պարունակությունը բույսի հյուսվածքում}}{\text{պարունակությունը հողում}}, \quad [30]$$

որտեղ *պարունակությունը բույսի հյուսվածքում* թիրախային մետաղի պարունակությունն է բերքահավաքի ենթարկված բույսի վերգետնյա կենսազանգվածում, *պարունակությունը հողում*՝ նույն մետաղի պարունակությունն է ֆիտոռեմեդիացիայի ենթարկված հողում:

Տրանսլոկացիոն գործակիցը ցույց է տալիս ընտրված բուսատեսակի արդյունավետությունը՝ պայմանավորված արմատային համակարգից վերգետնյա կենսազանգվածում մետաղների կուտակմամբ:

$$\text{Տրանսլոկացիոն գործակից (SQ)} = \frac{\text{պարունակությունը վերգետնյա զանգվածում}}{\text{պարունակությունը ստորգետնյա զանգվածում}}, [30]$$

որտեղ *պարունակությունը վերգետնյա զանգվածում* թիրախային մետաղի պարունակությունն է բույսի վերգետնյա կենսազանգվածում, *պարունակությունը ստորգետնյա զանգվածում*՝ նույն մետաղի պարունակությունն է բույսի արմատային կենսազանգվածում:
Կենսակուտակման գործակիցը (ԿԿԳ) կարելի է արտահայտել տոկոսներով հետևյալ բանաձևի օգնությամբ՝

$$\text{ԿԿԳ (\%)} = \frac{\text{պարունակությունը բույսի հյուսվածքում}}{\text{պարունակությունը հողում}} \times 100, [28]$$

որտեղ *պարունակությունը բույսի հյուսվածքում* թիրախային մետաղի պարունակությունն է բույսի վերգետնյա հյուսվածքներում, *պարունակությունը հողում*՝ նույն մետաղի պարունակությունն է հողում:
Համանման ձևով տրանսլոկացիոն գործակիցը կարելի է արտահայտել հետևյալ բանաձևով՝

$$\text{SQ (\%)} = \frac{\text{պարունակությունը վերգետնյա զանգվածում}}{\text{պարունակությունը ստորգետնյա զանգվածում}} \times 100, [28]$$

որտեղ *պարունակությունը վերգետնյա զանգվածում* թիրախային մետաղի պարունակությունն է բույսի վերգետնյա կենսազանգվածում, *պարունակությունը ստորգետնյա զանգվածում*՝ նույն մետաղի պարունակությունն է բույսի արմատային կենսազանգվածում:

SQ-ի 1-ից բարձր արժեքը վկայում է բույսի արմատային կենսազանգվածից դեպի վերգետնյա կենսազանգված ծանր մետաղների զգալի տրանսլոկացիայի մասին [16]: Հայտնի է, որ կենսակուտակման ու տրանսլոկացիոն գործակիցների 1-ից բարձր ցուցանիշներ ապահովող բուսատեսակները կարող են օգտագործվել ֆիտոէքստրակցիայի համար [16]: Գերկուտակող բուսատեսակների ԿԿԳ-ը որպես կանոն մեծ է 1-ից, իսկ երբեմն կարող է հասնել 50-100-ի [8]:

Հայտնի է, որ բույսերը հողային լուծույթից ծանր մետաղները կլանում ու կուտակում են իրենց արմատներում: Այնուհետև արմատներում կուտակված ծանր մետաղների իոնների մի մասը հիմնականում քսիլեմայի անոթներով տեղափոխվում է վերգետնյա մաս, որտեղ դրանք մեծ մասամբ կուտակվում են վակուոլներում [20]: Վակուոլները իրենցից ներկայացնում են բջջային բաղադրամասեր, որոնք աչքի են ընկնում ցածր նյութափոխանակության ակտիվությամբ: Վակուոլներում ծանր մետաղների կոնսերվացիան հանդիսանում է ցիտոպլազմայի մաս կազմող ցիտոզոլից ավելցուկային մետաղների իոնների հեռացման ուղիներից մեկը, որի արդյունքում բջջային նյութափոխանակության գործընթացների հետ դրանց փոխազդեցությունը նվազում է [3]:

Ծանր մետաղների ֆիտոէքստրակցիայի ամբողջ մեխանիզմը ունի հինգ հիմնական ասպեկտներ.

- 1) հողում ծանր մետաղների հալաթափում (մոբիլիզացիա),
- 2) բույսերի արմատների կողմից մետաղների իոնների կլանում,
- 3) արմատներում կուտակված մետաղների տեղափոխություն (տրանսլոկացիա) բույսերի վերգետնյա հյուսվածքներ,
- 4) բույսի հյուսվածքներում մետաղների իոնների պահեստավորում (կոնսերվացիա),
- 5) ծանր մետաղների նկատմամբ բույսերի հանդուրժողականության (տոլերանտություն) հատկություն:

Ծանր մետաղների նկատմամբ բույսերի հանդուրժողականության հատկությունը առանցքային նախապայման է հանդիսանում մետաղների կուտակման, հետևաբար և ֆիտոռեմեդիացիայի համար [7, 25]: Բույսերի բջիջներում ծանր մետաղների իոններն ակտիվորեն տեղափոխվում են վակուոլների մեջ, որտեղ, պեպտիդների հետ կապվելով,

առաջացնում են խելատային համալիր միացություններ [19]: Հոդային լուծույթից ծանր մետաղների տեղափոխությունը դեպի վակուոլներ վերահսկվում ու կարգավորվում է տարբեր մոլեկուլների միջոցով: Որոշ մոլեկուլներ ապահովում են թաղանթների միջով ծանր մետաղների ներթափանցումը, մյուսները մասնակցում են դրանց համալիր միացությունների առաջացմանն ու կոնսերվացմանը: Հոդային լուծույթից ծանր մետաղների իոնների կլանումը պայմանավորված է բույսերի արմատների պլազմատիկ թաղանթում հատուկ սպիտակուցների կամ H^+ կատիոնի հետ կապակցված սպիտակուցների առկայությամբ [15]: Օրինակ՝ ZIP (ZincRT, IronRT-like Protein) ընտանիքին պատկանող սպիտակուցները նպաստում են Zn^{2+} և Fe^{2+} մետաղների իոնների կլանմանը [7]: Nramp-ը (natural resistance-associated macrophage) սպիտակուցների ևս մեկ ընտանիք է, որը կարևոր դեր է խաղում երկվալենտ մետաղների իոնների տեղափոխման գործում [23]:

Ֆիտոռեմեդիացիան հանդիսանում է ծանր մետաղներով աղտոտված հողատարածքների բարելավմանը նպաստող հեռանկարային միջոցառումներից մեկը, որն այնուամենայնիվ ունի որոշ սահմանափակումներ [7, 18, 25].

- հողից ծանր մետաղների հեռացման ու աղտոտվածության չեզոքացման համար երկարատև ժամանակի անհրաժեշտությունը,

- ծանր մետաղներ գերկուտակող բուսատեսակների մեծամասնության աճի դանդաղ տեմպը ու քիչ վերգետնյա կենսազանգված առաջացնելու ունակությունը,

- հողի տարբեր ֆրակցիաների կողմից ուժեղ կապված մետաղների իոնների անջատման դժվարությունը և բույսի կլանման համար տարբեր աղտոտիչ նյութերի անմատչելիությունը,

- միջոցառումը կիրառելի է միայն ծանր մետաղներով հողի թույլ և միջին աղտոտվածության պայմաններում, քանի որ ուժեղ աղտոտվածության դեպքում բույսերը չեն աճում,

- միջոցառման ոչ պատշաճ իրականացման ու հետևողականության չպահպանման դեպքում առկա է սևնդային շղթա աղտոտիչների ներթափանցման վտանգ:

Ինչպես արդեն նշվել է ֆիտոռեմեդիացիան հանդիսանում է համեմատաբար նոր հետազոտական ու կիրառական ուղղություն: Ներկայումս հետազոտությունների մեծ մասը սահմանափակվում է լաբորատոր ու ջերմատնային պայմաններում ուսումնասիրություններով և միայն քիչ դեպքերում է, որ ֆիտոռեմեդիացիայի արդյունավետությունը ուսումնասիրվել է դաշտային պայմաններում: Պարզվել է, որ դաշտային ուսումնասիրությունների արդյունքները կարող են որոշակիորեն տարբերվել լաբորատոր ու ջերմատնային պայմաններում ստացված արդյունքներից, քանի որ իրական պայմաններում միաժամանակ առկա են տարբեր գործոններ: Դաշտային պայմաններում ֆիտոռեմեդիացիոն գործընթացի վրա կարող են ազդել գործոններ, որոնք կապված են՝ ջերմաստիճանի փոփոխության, սևնդատարրերի, մթնոլորտային տեղումների ու խոնավության, բույսերի վնասատուների ու հիվանդությունների հարուցիչների, հողում աղտոտիչ նյութերի անհավասարաչափ բաշխման, հողատիպի, հողի pH-ի և ստրուկտուրայի հետ: Թիրախային ծանր մետաղների ֆիտոռեմեդիացիայի նպատակով տարբեր բուսատեսակների օգտագործման արդյունավետությունը դաշտային պայմաններում ուսումնասիրելու դեպքում հնարավոր կլինի նաև տվյալ առաջարկվող տեխնոլոգիան տնտեսապես հիմնավորել ու առևտրայնացնել:

Ներկայումս ֆիտոռեմեդիացիայի նպատակով իրականացվող բազմակողմանի ուսումնասիրությունները առնչվում են գիտության տարբեր ճյուղերի հետ, որտեղ անհրաժեշտ են բազային գիտելիքներ՝ հողի քիմիայի, բույսերի կենսաբանության, էկոլոգիայի և հողի միկրոկենսաբանության, ինչպես նաև գենային ինժեներիայի վերաբերյալ:

Բնական գերկուտակող բուսատեսակների հայտնաբերումից հետո դրանց մոտ անհրաժեշտ հատկանիշները կարող են ընտրվել սելեկցիայի ավանդական մեթոդներով կամ հիբրիդիզացիայի նոր մեթոդների կիրառմամբ, ինչպիսին է պրոտոպլաստների միաձուլումը կամ գենների մանիպուլյացիայի միջոցով, որի դեպքում կոչվում են տրանսգեն բույսեր: Ներկայումս հետազոտությունները տարվում են բույսերում ծանր մետաղների կոնկրետ տեսակների գերկուտակման հատկության գենների հայտնաբերման ու կոդավորման ուղղությամբ: Այդպիսի գենների հայտնաբերումը և գենային ինժեներիայում դրանց օգտագործումը հնարավորություն կտա ստանալ բարձր հանդուրժողականության (տոլերանտության) հատկություն ունեցող բույսեր: Այսպիսով, անհրաժեշտ է տարբեր հատկանշական գծերի մեկտեղումը մեկ բույսի մեջ, որը կարող է լավագույն ձևով ծառայել իր նպատակին:

Գենային ինժեներայում օգտագործվող յուրաքանչյուր գենով պայմանավորված հատկանիշներն ու հատկությունները պետք է ուսումնասիրվեն համակողմանիորեն, որպեսզի ներկայում և ապագայում խուսափենք կենսոլորտում անցանկալի փոփոխություններից ու հետևանքներից: Չնայած բազմաթիվ դժվարությունների ու սահմանափակումների ֆիտոռեմեդիացիան հանդես է գալիս որպես «կանաչ տեխնոլոգիա» կիրառման մեծ հնարավորություններով: Հաշվի առնելով աշխարհում գիտության տարբեր ճյուղերի ինտեգրման ընթացիկ միտումները, կարելի է հուսալ, որ ֆիտոռեմեդիացիայի կիրառական ու կոմերցիոն խնդիրները ապագայում կստանան իրենց լուծումները:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1. Abhilash, P.C., Powell, J.R., Singh, H.B., Singh, B.K. Plant-microbe interactions: novel applications for exploitation in multipurpose remediation technologies. Trends Biotechnol., 30, 416-420, 2012.
2. Ali, H., Naseer, M., Sajad, M.A. Phytoremediation of heavy metals by *Trifolium alexandrinum*. Int. J. Environ. Sci., 2, 1459-1469, 2012.
3. Assuncao, A.G.L., Schat, H., Aarts, M.G.M. *Thlaspi caerulescens*, an attractive model species to study heavy metal hyperaccumulation in plants. New Phytol., 159, 351-360, 2003.
4. Brooks R.R., Lee J., Reeves R.D., Jaffrre, T. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. J. Geochem. Explor., 7, 49-57, 1977.
5. Brooks R.R., Chambers, M.F., Nicks, L.J., Robinson, B.H. Phytomining. Trends Plant Sci., 3, 359-362, 1998.
6. Chaney R.L. Plant uptake of inorganic waste constituents. In: Parr, J.F.E.A. (Ed.), Land Treatment of Hazardous Wastes. Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ, pp. 50-76, 1983.
7. Clemens S. Developing tools for phytoremediation: towards a molecular understanding of plant metal tolerance and accumulation. Int. J. Occup. Med. Environ. Health 14, 235-239. 2001.
8. Cluis C. Junk-greedy greens: phytoremediation as a new option for soil decontamination. BioTeach J., 2, 61-67, 2004.
9. Doty S.L., Shang Q.T., Wilson A.M., Moore A.L., Newman L.A., Strand S.E. Enhanced metabolism of halogenated hydrocarbons in transgenic plants containing mammalian P450 2E1. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 97, 6287-6291, 2007.
10. Ghazaryan K.A., Antonyan S.V., Movsesyan H.S. Copper phytoremediation potential of native plant species growing in the mine polluted areas of South Armenia. 2nd International Conference "Smart Bio", Kaunas, Lithuania, 3-5 May, p.104, 2018.
11. Ghazaryan K.A., Avetisyan R.E., Zhamharyan H.G. Copper bioaccumulation status and phytoremediation potential of some agricultural plant species growing in polluted agricultural lands of Armenia. 2nd International Conference "Smart Bio", Kaunas, Lithuania, 3-5 May, p.101, 2018.
12. Ghazaryan K.A., Movsesyan H.S., Khachatryan H.E., Antonyan S.V., Avetisyan R.E. Copper phytoremediation potential of wild plant species growing in the mine polluted areas of Armenia. Proceedings of the Global Symposium on Soil Pollution | FAO HQ | Rome, Italy, 2-4 May, p. 699-709, 2018.
13. Ghazaryan K.A., Movsesyan H.S., Khachatryan H.E., Ghazaryan N.P., Minkina T.M., Sushkova S.N., Mandzhieva S.S. and Rajput V.D. Copper phytoextraction and phytostabilization potential of wild plant species growing in the mine polluted areas of Armenia. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, <https://doi.org/10.1144/geochem2018-035>, 2018.
14. Ghazaryan K.A., Movsesyan H.S., Khachatryan H.E., Minkina T.M., Sushkova S.N. Copper absorption status of agricultural plant species and their phytoremediation potential. Proceedings of YSU (Chemistry and Biology), 51, 2, p. 106-112, 2017.
15. Greipsson S. Phytoremediation. Nat. Educ. Knowl. 2, 7. 2011.
16. Jamil S., Abhilash P.C., Singh N., Sharma P.N., *Jatropha curcas*: a potential crop for phytoremediation of coal fly ash. J. Hazard. Mater., 172, 269-275, 2009.

17. Kuiper, I., Lagendijk, E.L., Bloembergen, G.V., Lugtenberg, B.J.J. Rhizoremediation: a beneficial plant-microbe interaction. *Mol. Plant-Microbe Interact.*, 17, 6-15, 2004.
18. LeDuc, D.L., Terry, N. Phytoremediation of toxic trace elements in soil and water. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 32, 514-520, 2005.
19. Memon A.R., Schroder P. Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 16, 162-175, 2009.
20. Prasad M.N.V. Phytoremediation of metal-polluted ecosystems: hype for commercialization. *Russ. J. Plant Physiol.*, 50, 686-700, 2003.
21. Ravindran K.C., Venkatesan K., Balakrishnan V., Chellappan K.P., Balasubramanian, T. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils. *Soil Biol. Biochem.*, 39, 2661-2664, 2007.
22. Robinson B.H., Leblanc M., Petit D., Brooks, R.R., Kirkman, J.H., Gregg, P.E.H. The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils. *Plant Soil* 203, 47-56, 1998.
23. Seth C.S. A review on mechanisms of plant tolerance and role of transgenic plants in environmental clean-up. *Bot. Rev.* 78, 32-62, 2012.
24. Tangahu B.V., Abdullah S.R.S., Basri H., Idris M., Anuar N., Mukhlisin M., A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *Int. J. Chem. Eng.*, 10, 31 pp. 2011.
25. Van der Ent, A., Baker, A.J.M., Reeves, R.D., Pollard, A.J., Schat, H. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction. *Plant Soil.* 362, 319-334, 2013.
26. Vishnoi S.R., Srivastava P.N. Phytoremediation-green for environmental clean. In: The 12th World Lake Conference, pp. 1016-1021, 2008.
27. Wilson B., Pyatt F.B. Heavy metal bioaccumulation by the important food plant, *Olea europaea* L., in an ancient metalliferous polluted area of Cyprus. *Bull. Environ. Contamin. Toxicol.*, 78, 390-394, 2007.
28. Wu, G., Kang, H., Zhang, X., Shao, H., Chu, L., Ruan, C. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities. *J. Hazard. Mater.*, 174, 1-8, 2010.
29. Yadav R., Arora P., Kumar S., Chaudhury A. Perspectives for genetic engineering of poplars for enhanced phytoremediation abilities. *Ecotoxicology*, 19, 1574-1588, 2010.
30. Zhuang, P., Yang, Q., Wang, H., Shu, W. Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field. *Water Air Soil Pollut.*, 184, 235-242, 2007.

Ստացվել է 05.06.2019