

Галофитті өсімдіктердің ауыр металдар және тұздармен ластанған топырақтарды фитотазартудағы рөлі: дүниежүзілік тәжірибе және Қазақстан үшін мүмкіндіктер

Асанәлі Қабдулмәжитұлы*, Жанар Рахымжан, Румия Газитдинова

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; r.zhanar80@mail.ru ; tazitdinova_rm@enu.kz
akabdulmazhituly@bk.ru

*Корреспонденция: akabdulmazhituly@bk.ru

Аңдатпа. Топырақтың тұздануы мен ауыр металдармен ластануы қазіргі кезеңде жер ресурстарының деградациясына алып келетін негізгі экологиялық факторлардың қатарына жатады. Бұл құбылыстар әсіресе құрғақ және жартылай құрғақ аймақтарда кең таралып, ауыл шаруашылығы өнімділігінің төмендеуіне, топырақтың физика-химиялық қасиеттерінің бұзылуына және экожүйелердің тұрақтылығының әлсіреуіне себеп болуда. Аридті климат жағдайында тұздану мен техногендік ластану көбіне бір мезгілде байқалып, топырақтың табиғи өзін-өзі қалпына келтіру процестерін айтарлықтай шектейді. Осыған байланысты экологиялық тұрғыдан қауіпсіз әрі ұзақ мерзімді қалпына келтіру тәсілдерін іздеу өзекті болып отыр. Бұл шолу-зерттеуде тұзданған және ауыр металдармен (Pb, Cd, Zn, Cu) ластанған топырақтарды фитотазартуда галофитті өсімдіктердің рөлі жан-жақты қарастырылды. Әсіресе *Salicornia europaea*, *Suaeda*, *Atriplex* және басқа да галофит түрлерінің тұз иондары мен ауыр металдарды жинақтау қабілеті физиологиялық және молекулалық деңгейде талданды. Дүниежүзілік зерттеулердің нәтижелері Қазақстан аумағындағы деректермен салыстырылып, фиторемедиация тиімділігіне әсер ететін экологиялық және геохимиялық факторлар айқындалды. Зерттеу нәтижелері галофитті өсімдіктердің кешенді ластанған топырақтарда тұздану деңгейін төмендетумен қатар ауыр металдардың биожетімді және жылжымалы формаларын азайта алатынын көрсетті. Қазақстан жағдайында галофиттерді қолдану деградацияланған жерлерді қалпына келтіру, экожүйелік тұрақтылықты арттыру және экологиялық тәуекелдерді басқару тұрғысынан перспективті бағыт болып табылады. Алынған қорытындылар фиторемедиацияны табиғи-бағдарланған және ғылыми негізделген шешім ретінде практикалық қолдануға мүмкіндік береді. Бұл бағытты дамыту жер ресурстарын ұтымды пайдалану, экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз ету және тұрақты агроэкожүйелерді қалыптастыру үшін маңызды.

Түйін сөздер: топырақ тұздануы; ауыр металдар; галофитті өсімдіктер; фиторемедиация; *Salicornia europaea*.

Дәйексөз: Қабдулмәжитұлы, А., Рахымжан, Ж., Газитдинова, Р. (2025). Галофитті өсімдіктердің ауыр металдар және тұздармен ластанған топырақтарды фитотазартудағы рөлі: дүниежүзілік тәжірибе және Қазақстан үшін мүмкіндіктер. *Journal of Ecology and Sustainability*, 153(1), 106-125. <https://doi.org/10.32523/c1c0kp74>

Академиялық редактор:
А. Зандыбай

Редакцияға түсті: 14.12.2025
Түзетілді: 22.12.2025
Қабылданды: 24.12.2025
Басылымға шықты: 30.12.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Кіріспе

Соңғы онжылдықта ғалымдарды топырақтың тұздануы мен ауыр металдармен ластануы алаңдатууда. Бұл процестер табиғи-климаттық факторлармен қатар антропогендік әсердің күшеюі нәтижесінде кең таралып, экожүйелердің деградациясына және ауыл шаруашылығы жерлерінің өнімділігінің төмендеуіне алып келуде. Тұзданған және ауыр металдармен ластанған топырақтар өсімдіктердің өсуін тежеп, биогеохимиялық айналымдардың бұзылуына себеп болады (Qadir et al., 2014). Қазақстан аумағында бұл мәселе аридті және жартылай аридті аймақтардың басым болуына байланысты ерекше өзектілікке ие.

Топырақ экожүйелері заттар айналымын қамтамасыз етуде, өсімдік жамылғысын қалыптастыруда және құрлық экожүйелерінің тұрақтылығын сақтауда шешуші рөл атқарады. Топырақтың физика-химиялық қасиеттерінің бұзылуы микроағзалардың белсенділігіне, өсімдіктердің қоректенуіне және трофикалық тізбектердің тұрақтылығына тікелей әсер етеді. Ауыр металдар мен тұздардың артық мөлшері топырақ биотасының қызметін әлсіретіп, экожүйелік тепе-теңдіктің бұзылуына әкеледі (Alloway, 2013).

Атап айтқанда, тұздану мен ауыр металдар топырақтағы өсімдіктердің түрлік құрамын өзгертеді, сезімтал түрлердің ығыстырылуына және төзімді өсімдіктердің басым болуына жағдай жасайды. Мұндай ортада галофитті өсімдіктер ерекше экологиялық маңызға ие, себебі олар жоғары тұз концентрацияларына бейімделіп қана қоймай, ауыр металдарды өз биомассасында жинақтай алады (Flowers & Colmer, 2021). Ұзақ мерзімді әсер жағдайында галофиттер топырақтың қасиеттерін біртіндеп жақсартып, қалпына келу процестерін іске қосады (Zhou et al., 2022).

Жұмыстың мақсаты: тұзданған және ауыр металдармен ластанған топырақтарды фитотазартуда галофитті өсімдіктердің, соның ішінде *Salicornia europaea* және басқа галофит түрлерінің рөлін талдау және Қазақстан жағдайында оларды қолдану мүмкіндіктерін бағалау.

Негізгі міндеттер:

- топырақтың тұздануы мен ауыр металдармен ластануының негізгі көздерін анықтау;
- галофитті өсімдіктердің экологиялық және физиологиялық бейімделу механизмдерін сипаттау;
- *Salicornia europaea* және басқа галофиттердің ауыр металдар мен тұз иондарын жинақтау қабілетін талдау;
- фиторемедиациядағы галофиттердің тиімділігін салыстырмалы түрде бағалау;
- Қазақстан жағдайында галофиттерді қолданудың экологиялық және практикалық мүмкіндіктерін қарастыру;
- деградацияланған топырақтарды қалпына келтірудің биологиялық стратегияларын ұсыну.

2. Әдебиеттерге шолу

Топырақтың тұздануы және ауыр металдармен ластануы: жаһандық үрдістер

Топырақтың тұздануы мен ауыр металдармен ластануы қазіргі уақытта жер ресурстарының деградациясының негізгі факторларының бірі болып саналады. FAO деректеріне сәйкес, әлем бойынша суармалы ауыл шаруашылығы жерлерінің шамамен 20–30 %-ы әртүрлі деңгейде тұздануға ұшыраған, бұл көрсеткіш жыл сайын артып келеді (FAO, 2021). Тұздану топырақ ерітіндісіндегі осмостық қысымды арттырып, өсімдіктердің су сіңіру қабілетін төмендетеді және иондық уыттылық тудырады (Rengasamy, 2016).

Ауыр металдармен ластану көбінесе тау-кен өндіру, металлургия, энергетика және ауыл шаруашылығында тыңайтқыштар мен пестицидтерді қолдану нәтижесінде қалыптасады. Қорғасын (Pb), кадмий (Cd), мырыш (Zn), мыс (Cu) және никель (Ni) сияқты элементтер топырақта ұзақ уақыт сақталып, биологиялық ыдырауға ұшырамайды (Alloway, 2013). Бұл металдар топырақ микроағзаларының белсенділігін тежеп, органикалық заттардың минерализациясын баяулатады және өсімдіктердің физиологиялық процестерін бұзады (Wang et al., 2021). Аридті аймақтарда булану қарқындылығы жоғары және топырақтың табиғи шайылуы әлсіз. Мұндай жағдайда кешенді ластану топырақтың құрылымын бұзып, экожүйелердің өзін-өзі қалпына келтіру қабілетін айтарлықтай төмендетеді (Qadir et al., 2014).

Галофитті өсімдіктердің экологиялық ерекшеліктері

Галофиттер – жоғары тұз концентрацияларына бейімделген өсімдіктер тобы, олар табиғи түрде теңіз жағалауларында, сор және тұзды батпақтарда таралған. Бұл өсімдіктер тұз иондарының уытты әсерін төмендету үшін бірқатар морфологиялық және физиологиялық бейімделу механизмдерін дамытқан. (Glenn et al., 1999; Rozema & Flowers, 2008; Gupta & Huang, 2020). Олардың қатарына иондарды вакуольдерде жинақтау, тұз бездері арқылы сыртқа шығару және осмореттеуші органикалық қосылыстарды синтездеу жатады (Flowers & Colmer, 2021).

Галофиттердің экологиялық артықшылығы тек тұзға төзімділікпен шектелмейді. Көптеген галофит түрлері ауыр металдарды өз биомассасында жинақтай алады, бұл оларды фиторемедиация үшін перспективті етеді. Зерттеулер *Salicornia*, *Suaeda*, *Atriplex* және *Halocnemum* туыстарына жататын өсімдіктердің кадмий, қорғасын және мырышты сіңіру қабілеті жоғары екенін көрсеткен (Manousaki & Kalogerakis, 2011; Khalilzadeh et al., 2021).

***Salicornia europaea* және басқа галофиттердің фитотазартудағы рөлі**

Salicornia europaea – ең көп зерттелген галофит түрлерінің бірі. Ол жоғары тұз концентрацияларында өсіп, айтарлықтай биомасса түзеді. Бірқатар тәжірибелік жұмыстарда *Salicornia europaea* тұз иондарымен қатар ауыр металдарды да тиімді жинақтай алатыны дәлелденген. Мысалы, зерттеулерде кадмий мен мырыштың өсімдік тамырларында басым жиналатыны, ал белгілі бір бөлігі жер үсті мүшелеріне тасымалданатыны көрсетілген (Zhou et al., 2022). Басқа галофитті өсімдіктер де фиторемедиацияда маңызды рөл атқарады. *Suaeda* туысының өкілдері жоғары тұздылық жағдайында өсіп, ауыр металдарды тұрақтандыру немесе фитостабилизациялау қабілетімен ерекшеленеді. *Atriplex* түрлері кең тамыр жүйесінің арқасында топырақ құрылымын жақсартып, эрозияны төмендетеді және ауыр металдардың миграциясын шектейді (Hasanuzzaman et al., 2020).

Галофиттердің фитотазартудағы тиімділігі олардың биомасса түзу қабілетіне, тамыр жүйесінің дамуына және ластаушы заттарды жинақтау коэффициенттеріне тәуелді. Сонымен қатар, өсімдік пен топырақ микроағзалары арасындағы өзара әрекет ауыр металдардың қозғалғыштығын өзгертіп, тазарту процестерін жеделдетуі мүмкін (Rajkumar et al., 2020).

Қазақстан жағдайындағы зерттеулер

Қазақстан аумағында тұзданған және ауыр металдармен ластанған топырақтар кең таралған, әсіресе Арал теңізі маңы, Каспий маңы ойпаты және тау-кен өндірісі дамыған аймақтарда. Отандық зерттеулерде галофитті өсімдіктердің жергілікті флорада кең таралғаны және оларды деградацияланған жерлерді қалпына келтіруде қолданудың әлеуеті бар екені көрсетілген (Ramazanova et al., 2021).

Галофиттердің ауыр металдарды жинақтау механизмдері (молекулалық және физиологиялық деңгейде)

Галофитті өсімдіктердің ауыр металдарға төзімділігі мен оларды жинақтау қабілеті көпдеңгейлі физиологиялық және молекулалық механизмдер арқылы қамтамасыз етіледі. Бұл механизмдер өсімдіктерге ауыр металдардың уытты әсерін төмендетіп, экстремалды экологиялық жағдайларда тіршілік етуге мүмкіндік береді. Галофиттерде бұл жүйелер гликофиттермен салыстырғанда айқынырақ дамыған (Flowers & Colmer, 2021).

Физиологиялық деңгейде ауыр металдардың жинақталуы алдымен тамыр жүйесінде жүреді. Кадмий, қорғасын және мырыш сияқты элементтер тамыр эпидермисі мен ризодерма арқылы сіңіріліп, жасуша қабырғасында немесе вакуольдерде байланысқан күйде сақталады. Бұл құбылыс металдардың жер үсті мүшелеріне шамадан тыс тасымалдануын шектеп, фотосинтетикалық аппаратты қорғауға бағытталған қорғаныш механизмі болып табылады (Alloway, 2013; Manousaki & Kalogerakis, 2011).

Галофиттерде ауыр металдардың уыттылығын төмендетудің маңызды физиологиялық жолдарының бірі – вакуолизация. Металл иондары вакуольдерге тасымалданып, цитозольден оқшауланады. Бұл процесс иондық гомеостазды сақтауға және метаболизмдік процестердің бұзылуын болдырмауға мүмкіндік береді (Hossain et al., 2021). *Salicornia europaea* өсімдігінде вакуольдердің көлемі мен санының артуы ауыр металдарға төзімділіктің негізгі факторларының бірі ретінде қарастырылады (Zhou et al., 2022).

Молекулалық деңгейде ауыр металдарды жинақтау арнайы металл-тасымалдаушы

акуыздардың қатысуымен жүзеге асады. Галофиттерде ZIP (ZRT/IRT-like proteins), NRAM (Natural Resistance-Associated Macrophage Protein) және HMA (Heavy Metal ATPase) тұқымдасына жататын тасымалдаушы акуыздардың экспрессиясы жоғары екені анықталған. Бұл акуыздар металл иондарының жасушаға енуін, жасушаішілік қайта бөлінуін және вакуольдерге тасымалдануын реттейді (Clemens, 2019; Khalilzadeh et al., 2021).

Ауыр металдардың уыттылығын төмендетуде метал-хелаттаушы қосылыстардың синтезі маңызды рөл атқарады. Галофиттерде фитохелатиндер мен металлотииониндердің синтезі күшейеді, олар металл иондарымен кешендер түзіп, олардың биологиялық белсенділігін төмендетеді. Бұл кешендер кейін вакуольдерде жинақталып, жасуша үшін салыстырмалы түрде қауіпсіз күйге өтеді (Rajkumar et al., 2020).

Сонымен қатар, ауыр металдар өсімдік жасушаларында реактивті оттегі түрлерінің (ROS) түзілуін күшейтеді. Галофиттерде антиоксиданттық жүйе жақсы дамыған, оған супероксиддисмутаза, каталаза және пероксидаза сияқты ферменттер кіреді. Бұл ферменттер оксидативті стресті төмендетіп, жасуша мембраналары мен акуыздардың зақымдануын болдырмайды (Hasanuzzaman et al., 2020; Gill & Tuteja, 2010).

Галофиттердің ауыр металдарды жинақтау механизмдері тұзға төзімділік жүйелерімен тығыз байланысты. Тұз иондары мен ауыр металдардың бір мезгілде әсер етуі иондық тасымалдау жүйелерінің қайта құрылуына әкеледі, нәтижесінде кейбір ауыр металдар тұз стресіне жауап беретін тасымалдаушылар арқылы да реттелуі мүмкін. Бұл құбылыс *Salicornia* және *Suaeda* туыстарының кешенді ластанған топырақтарда жоғары төзімділік көрсетуін түсіндіреді (Flowers & Colmer, 2021; Zhou et al., 2022).

Галофитті өсімдіктердің ауыр металдарды жинақтау қабілеті физиологиялық оқшаулау, молекулалық тасымалдау жүйелері, хелаттау және антиоксиданттық қорғаныш механизмдерінің үйлескен әрекеті арқылы жүзеге асады. Бұл қасиеттер галофиттерді тұзданған және ауыр металдармен ластанған топырақтарды фитотазартуда тиімді биологиялық құрал ретінде қарастыруға негіз береді (Khan & Weber, 2008; Clemens, 2019; Gupta & Huang, 2020).

***Salicornia europaea* және басқа галофитті өсімдіктердің фитотазартудағы салыстырмалы тиімділігі**

Галофитті өсімдіктердің фитотазартудағы тиімділігі олардың физиологиялық бейімделу деңгейіне, биомасса түзу қабілетіне, ауыр металдарды жинақтау және тасымалдау ерекшеліктеріне байланысты өзгереді. Осы тұрғыда *Salicornia europaea* жиі *Suaeda*, *Atriplex* және *Halocnemum* туыстарына жататын галофиттермен салыстырыла отырып зерттеледі.

Salicornia europaea жоғары тұздылық жағдайында тез өсіп, салыстырмалы түрде қысқа вегетациялық кезеңде едәуір биомасса түзе алады. Бұл қасиет фитотазартудың тиімділігін арттырады, себебі ауыр металдардың жалпы мөлшері өсімдік биомассасының көлеміне тікелей байланысты (Zhou et al., 2022). Зерттеулерде *Salicornia* түрлерінің кадмий мен мырышты жинақтау коэффициенттері (bioaccumulation factor) *Suaeda* және *Atriplex* түрлерімен салыстырғанда жоғары екені көрсетілген (Khalilzadeh et al., 2021).

Suaeda туысына жататын галофиттер ауыр металдарға жоғары төзімділігімен ерекшеленеді, алайда олардың фитотазартудағы рөлі көбінесе фитостабилизациямен шектеледі. Бұл өсімдіктер металдарды негізінен тамыр жүйесінде ұстап, олардың топырақта миграциясын төмендетеді, бірақ жер үсті мүшелеріне тасымалдау деңгейі салыстырмалы түрде төмен болады (Manousaki & Kalogerakis, 2011). Сондықтан *Suaeda* түрлері ауыр металдардың таралуын шектеуде тиімді болғанымен, оларды жүйеден толық шығару тұрғысынан *Salicornia*-мен салыстырғанда тиімділігі төмен.

Atriplex туысының өкілдері кең және терең дамыған тамыр жүйесіне ие, бұл оларды эрозияға ұшыраған және құрылымы бұзылған топырақтарда қолдануға мүмкіндік береді. *Atriplex* түрлері тұзға төзімділігімен қатар, қорғасын мен мырышты жинақтай алады, алайда олардың ауыр металдарды сіңіру қарқындылығы көбінесе орташа деңгейде бағаланады (Hasanuzzaman et al., 2020). Бұл өсімдіктер көбіне топырақтың физикалық қасиеттерін жақсарту және ұзақ мерзімді экожүйелік тұрақтылықты қамтамасыз ету мақсатында қолданылады.

Halocnemum және оған жақын туыстар экстремалды тұзданған ортаға жоғары бейімделгенімен, олардың өсу қарқыны мен биомасса түзу қабілеті төмен. Осы себепті бұл

галофиттер фитотазартуда қосалқы немесе локальды құрал ретінде қарастырылады (Flowers & Colmer, 2021).

Салыстырмалы талдау нәтижелері *Salicornia europaea*-ның кешенді ластанған, яғни тұздану мен ауыр металдар бір мезгілде әсер ететін топырақтарда фитотазартудың белсенді формасы үшін анағұрлым қолайлы екенін көрсетеді. Ал *Suaeda* және *Atriplex* түрлері фитостабилизация мен экожүйені ұзақ мерзімді қалпына келтіру стратегияларында тиімді болып табылады (Glenn et al., 1999; Ventura & Sagi, 2013; Khan & Weber, 2008). Сондықтан практикалық тұрғыдан галофиттерді қолдану кезінде бір ғана түрге емес, бірнеше галофит түрлерінің комбинациясына негізделген интеграцияланған тәсілді қолдану ұсынылады (Rajkumar et al., 2020).

Фиторемедиацияның шектеулері мен тәуекелдері

Галофитті өсімдіктерді тұзданған және ауыр металдармен ластанған топырақтарды фитотазартуда қолдану экологиялық тұрғыдан перспективті болғанымен, бұл әдістің бірқатар шектеулері мен тәуекелдері бар. Ең алдымен, фитотазарту процесі ұзақ уақытты талап етеді және оның тиімділігі өсімдік өсу қарқынына, климаттық жағдайларға және топырақтың бастапқы ластану деңгейіне тәуелді (Rajkumar et al., 2020).

Фиторемедиацияның негізгі шектеулерінің бірі – ауыр металдардың өсімдік биомассасында жинақталуы. Егер жиналған биомасса уақтылы жиналмаса немесе дұрыс кәдеге жаратылмаса, ауыр металдар қайтадан топыраққа түсуі мүмкін, бұл екінші реттік ластануға әкеледі (Ali et al., 2013; Tangahu et al., 2011). Осыған байланысты фитотазартуда қолданылатын галофиттердің биомассасын жинау, сақтау және залалсыздандыру стратегияларын алдын ала жоспарлау қажет.

Тағы бір маңызды мәселе – ауыр металдардың өсімдіктерде негізінен тамыр жүйесінде жинақталуы. Бұл жағдайда фитостабилизация басым болады, яғни металдар топырақта бекітіледі, бірақ жүйеден толық шығарылмайды. Мұндай тәсіл экожүйені уақытша тұрақтандыруға мүмкіндік бергенімен, ұзақ мерзімді перспективада ластанған аумақтарды толық қалпына келтіру үшін жеткіліксіз болуы мүмкін (Manousaki & Kalogerakis, 2011).

Климаттық факторлар да фитотазартудың тиімділігіне айтарлықтай әсер етеді. Құрғақ аймақтарда ылғалдың жетіспеушілігі галофиттердің өсуін шектеп, ауыр металдарды сіңіру қарқындылығын төмендетуі мүмкін. Сонымен қатар, төмен температуралар немесе вегетациялық кезеңнің қысқалығы өсімдіктердің биомасса түзу мүмкіндігін азайтады (Flowers & Colmer, 2021).

Экожүйелік тұрғыдан алғанда, галофиттердің монокультура түрінде кеңінен енгізілуі жергілікті флораның құрылымын өзгертуі мүмкін. Кейбір жағдайларда галофиттер басқа өсімдік түрлерін ығыстырып, биоәртүрліліктің төмендеуіне себеп болуы ықтимал. Сондықтан фитотазарту жобаларын жоспарлау кезінде жергілікті экожүйенің ерекшеліктерін және биологиялық тепе-теңдікті сақтау мәселелерін ескеру қажет (Hasanuzzaman et al., 2020).

Осылайша, галофиттерді фитотазартуда қолдану кешенді тәсілді талап етеді. Фиторемедиацияның тиімділігін арттыру үшін галофиттерді басқа әдістермен, мысалы, микробиологиялық ремедиациямен, топырақ қоспаларымен немесе инженерлік шешімдермен үйлестіру ұсынылады (Ali et al., 2013; Rajkumar et al., 2020).

Дүниежүзі бойынша топырақтың тұздану деңгейі

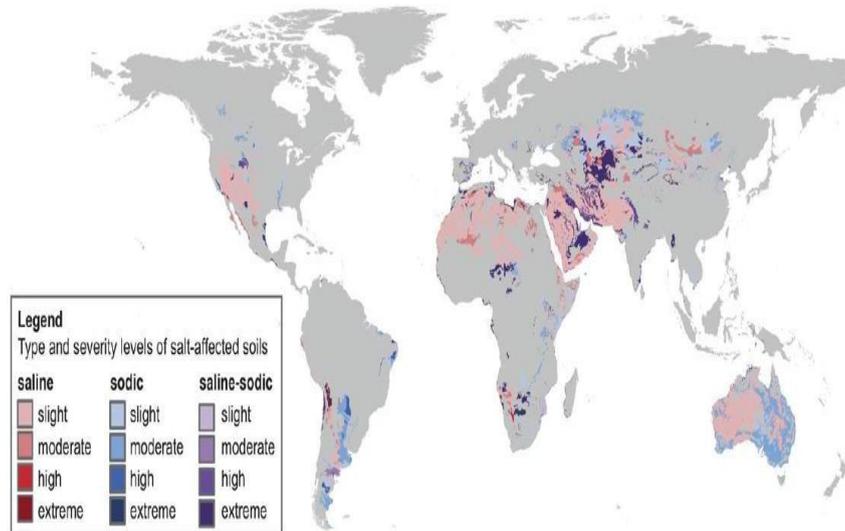
Дүниежүзі бойынша тұзданған және сортаң топырақтардың таралуы ғаламдық экологиялық проблема ретінде сипатталады. Халықаралық деректерге сәйкес, тұзданған топырақтар барлық құрлықтарда кездеседі және олардың негізгі бөлігі құрғақ және жартылай құрғақ климаттық аймақтарда шоғырланған. Бұл жағдай жауын-шашын мөлшерінің аздығы, буланудың жоғары болуы және минералданған жерасты суларының топырақ бетіне жақын орналасуымен тікелей байланысты (FAO & Global Soil Partnership, 2015).

Картографиялық деректер дүниежүзі бойынша топырақ тұздануының кеңістіктік әркелкі таралғанын көрсетеді. Әсіресе Орталық Азия, Таяу Шығыс, Солтүстік Африка, Австралия және Солтүстік Американың кейбір аймақтарында тұздану деңгейі жоғары екені анық байқалады (Сурет 1). Бұл аймақтарда тұзды, сортаң және тұзды-сортаң топырақтар басым болып келеді (Wicke et al., 2011).

Ғаламдық бағалаулар бойынша қазіргі таңда шамамен 830 млн гектардан астам жер әртүрлі дәрежеде тұздануға ұшыраған, оның ішінде суармалы егіншілік жерлерінің 20–30%-ы екінші реттік тұздану әсеріне шалдыққан (Rengasamy, 2010; Qadir et al., 2014). Бұл құбылыс ауыл

шаруашылығы өнімділігінің төмендеуіне, топырақ құрылымының бұзылуына және экожүйелердің деградациясына алып келеді.

Осыған байланысты дүниежүзілік тәжірибеде тұзданған топырақтарды қалпына келтірудің экологиялық тұрғыдан қауіпсіз және тұрақты әдістеріне, соның ішінде галофитті өсімдіктерді қолдануға негізделген фиторемедиация технологияларына ерекше назар аударылуда (Flowers & Colmer, 2021).



Сурет 1. Дүниежүзі бойынша топырақтың тұздануы және сортадануының кеңістіктік таралуы

Дүниежүзі бойынша топырақтың тұздану динамикасын бағалау үшін Wicke et al. (2011) еңбегіндегі ғаламдық картографиялық деректер пайдаланылды. Бұл материалдар аридті және жартылай аридті аймақтарда тұзданудың кең ауқымда таралғанын дәлелдейді, әсіресе Орталық Азия, Таяу Шығыс және Солтүстік Африка өңірлерінде (Wicke et al., 2011). Осы деректер негізінде қайта сызылған кеңістіктік үлестірім Сурет 1-де көрсетілген.

Карта деректері бойынша орташа және күшті тұзданған аумақтар негізінен су тапшылығы байқалатын, булануы жоғары және ирригациялық жүктемесі үлкен өңірлерде шоғырланған. Бұл жағдай екінші реттік тұзданудың ғаламдық сипат алғанын көрсетеді.

Галофитті өсімдіктермен тұзданған топырақтарды фиторемедиациялау (дүниежүзілік деректер)

Әдеби деректерді талдау нәтижесінде галофитті өсімдіктердің тұзды ортаға жоғары физиологиялық бейімделгені анықталды. *Salicornia europaea* өсімдігі иондарды (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) вакуольдерде жинау арқылы осмостық тепе-теңдікті сақтап, топырақтағы тұз концентрациясын төмендетуге әсер етеді (Flowers & Colmer, 2021; Yuan et al., 2020). Түрлі елдерде жүргізілген эксперименттер Na^+ концентрациясының орта есеппен 20–30%-ға, Cl^- мөлшерінің 18–29%-ға азайғанын, ал топырақ ерітіндісінің электр өткізгіштігі (EC) 15–25%-ға төмендегенін көрсетеді. Сонымен қатар өсімдік биомассасы артқан сайын тұздарды жинау қарқыны айтарлықтай жоғарылайтыны байқалған (Zhou et al., 2022; Ahmadi et al., 2022). Жинақталған бұл нәтижелер галофитті өсімдіктерді тұзданған топырақтарды қалпына келтірудің тиімді, экологиялық қауіпсіз биологиялық құралы ретінде қолдануға мүмкіндік беретінін дәлелдейді.

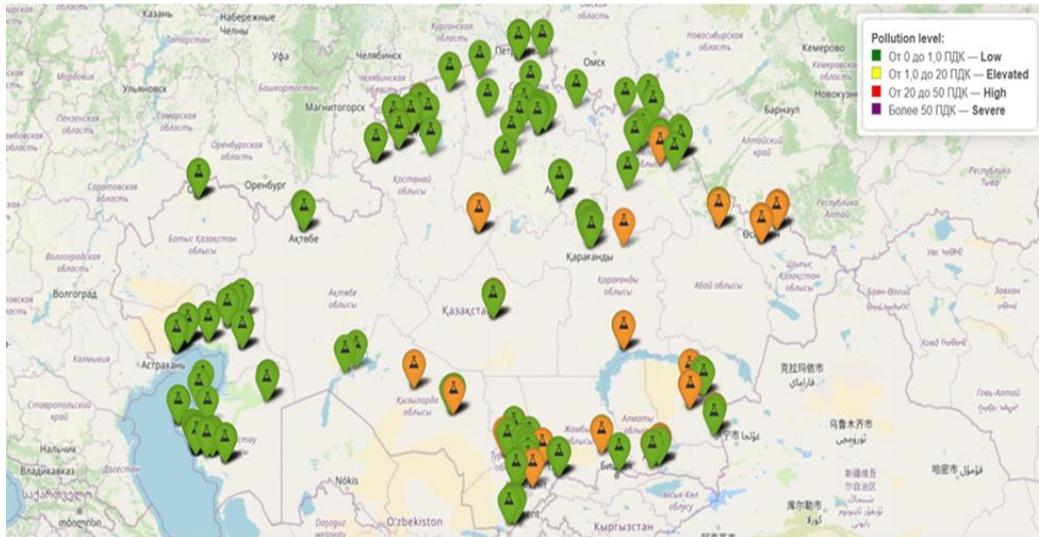
Қазақстан аумағындағы топырақтың тұздануы және салыстырмалы бағалау

Қазақстан аумағында тұзданған топырақтардың жалпы ауданы шамамен 90 млн гектарды құрайды, бұл ел территориясының 40%-ына жуық (Baibekova & Sarsekova, 2021). Тұздану деңгейі ең жоғары өңірлерге Арал маңы, Павлодар, Қызылорда, Атырау, Абай және Шығыс Қазақстан облыстары жатады.

Қазақстан бойынша алынған деректер дүниежүзілік көрсеткіштермен салыстырғанда тұздану қарқындылығының жоғары екенін көрсетеді, алайда фиторемедиация нәтижелері бойынша тиімділік деңгейі халықаралық тәжірибелермен сәйкес келеді (Levina & Serikbayeva, 2020; Weisenova et al., 2020).

Ауыр металдармен ластанған топырақтар: дүниежүзі және Қазақстан

Ғаламдық деңгейде ауыр металдармен (Pb, Cd, Zn, Cu) ластанған топырақтар өнеркәсіптік, тау-кен және урбандалған аймақтарда шоғырланған. Зерттеулер бойынша дүниежүзіндегі егістік жерлердің 14–17%-ында ауыр металдардың концентрациясы фондық деңгейден жоғары (Amin et al., 2020; Li et al., 2021).



Сурет 2. Қазақстан Республикасындағы топырақтың ауыр металдармен ластануының кеңістіктік таралуы

Қазақстандағы ауыр металдармен ластанған аумақтардың таралуын бағалау үшін Kazhydromet (2023) ұсынған интерактивті картаның мәліметтері пайдаланылды. Картографиялық деректер өнеркәсіптік өңірлерде Pb және Cd концентрациясының жоғары екенін көрсетеді, әсіресе Өскемен, Павлодар және Балқаш аймақтарында (Kazhydromet, 2023). Осы ақпарат негізінде дайындалған кеңістіктік үлестірім Сурет 2-де көрсетілген.

Қазақстанда ауыр металдармен ластану деңгейі негізінен металлургия және энергетика объектілері орналасқан аймақтарда жоғары. Өскемен, Павлодар, Шымкент және Балқаш маңындағы топырақтарда Pb және Cd мөлшері шекті рұқсат етілген концентрациялардан бірнеше есе жоғары екені анықталған (Ramazanova et al., 2021; Woszczyk et al., 2018). Ауыр металдардың таралуы жер пайдаланудың сипатына байланысты өзгертіні және техногендік факторлардың рөлі шешуші екені де халықаралық зерттеулерде көрсетілген (Wicke et al., 2011).

Фиторемедиациялық зерттеулер нәтижелері бойынша *Salicornia europaea* өсімдігі ауыр металдардың жылжымалы формаларын тиімді сіңіреді. Pb және Cd концентрациясының 15–35%-ға төмендеуі, ал Zn және Cu элементтерінің биожетімділігінің азаюы тіркелген (Khalilzadeh et al., 2021; Ashraf et al., 2020).

Галофитті өсімдіктердің биомассасын басқару және кәдеге жарату мәселелері

Фиторемедиация тиімділігі галофитті өсімдіктердің биомассасын дұрыс басқаруға тікелей байланысты. Өсімдік биомассасында жинақталған тұздар мен ауыр металдар уақтылы жиналмаса, олар қайтадан топыраққа түсуі мүмкін. Сондықтан биомассаны жинау, сақтау және залалсыздандыру фиторемедиациялық жүйенің ажырамас бөлігі болып табылады (Ali et al., 2013).

Галофит биомассасын кәдеге жаратудың бірнеше бағыты бар. Бірінші бағыт – биомассаны энергетикалық мақсатта пайдалану. Кейбір зерттеулерде *Salicornia* биомассасының биожанармай немесе биогаз өндіру үшін жарамды екені көрсетілген, алайда ауыр металдардың концентрациясы бұл бағытты шектейтін фактор болып табылады (Ventura et al., 2015). Сондықтан энергетикалық қолдану алдында биомассаның химиялық құрамын мұқият талдау қажет.

Екінші бағыт – биомассаны өнеркәсіптік немесе техникалық шикізат ретінде пайдалану. Бұл жағдайда ауыр металдармен байытылған биомасса арнайы өңдеуден өтіп, металдарды бөліп алу немесе қауіпсіз түрде оқшаулау мүмкіндігі қарастырылады. Мұндай тәсілдер қазіргі уақытта

зерттеу сатысында болғанымен, болашақта фиторемедиацияның экономикалық тиімділігін арттыруы мүмкін (Rajkumar et al., 2020).

Үшінші бағыт – биомассаны қауіпсіз көму немесе компостау. Алайда бұл тәсілдер екінші реттік ластану қауіпіне байланысты шектеулі түрде ғана ұсынылады. Компостау кезінде ауыр металдардың қайта мобилизациялану мүмкіндігі бар, сондықтан бұл әдіс тек тұз жүктемесі басым, ал ауыр металдар мөлшері төмен жағдайларда ғана қолданылуы тиіс (Hasanuzzaman et al., 2020).

Экожүйелік әсерлер және ұзақ мерзімді тұрақтылық

Галофитті өсімдіктерді қолданудың экожүйелік әсерлері тек топырақтың физика-химиялық қасиеттерінің жақсаруымен шектелмейді. Фиторемедиация нәтижесінде топырақ микробиологиялық белсенділігі артып, органикалық заттардың жиналуы күшейеді. Бұл өз кезегінде өсімдік жамылғысының біртіндеп қалпына келуіне және биоәртүрліліктің артуына ықпал етеді (Flowers & Colmer, 2021).

Ұзақ мерзімді зерттеулер көрсеткендей, галофиттерді бірнеше вегетациялық кезең қатарынан қолдану топырақтың тұздық және техногендік жүктемесін тұрақты түрде төмендетуге мүмкіндік береді. Алайда бұл әсер климаттық жағдайларға, су режиміне және бастапқы ластану деңгейіне тәуелді. Сондықтан фиторемедиацияны енгізу алдында аумақтың экологиялық мониторингі міндетті болып табылады (Qadir et al., 2014).

Сонымен қатар, галофиттердің монокультура түрінде ұзақ уақыт қолданылуы экожүйелік тепе-теңдікке кері әсер етуі мүмкін. Осы себепті зерттеушілер галофиттерді көптүрлі өсімдік қауымдастықтары құрамында қолдануды және табиғи сукцессиялық процестерді ескеруді ұсынады (Hasanuzzaman et al., 2020; Glenn et al., 1999; Lal, 2020).

Климаттың өзгеруі жағдайында галофиттерді қолданудың өзектілігі

Климаттың жаһандық өзгеруі аридті және жартылай аридті аймақтардағы топырақ деградациясының қарқындылығын күшейтетін фактор ретінде қарастыруда. Температураның жоғарылауы, жауын-шашын режимінің өзгеруі және экстремалды климаттық құбылыстардың жиілеуі топырақтағы тұздардың миграциясын жеделдетіп, екінші реттік тұздану процестерін күшейтеді. Бұл құбылыстар әсіресе ішкі құрлықтық аймақтарда, соның ішінде Қазақстан аумағында айқын байқалады (IPCC, 2023; Rozema & Flowers, 2008; Glenn et al., 1999).

Климаттың өзгеруі жағдайында су ресурстарының тапшылығы суармалы егіншілікте минералданған суды пайдалануды арттырады, бұл топырақтың тұздануына қосымша қысым түсіреді. Мұндай жағдайда дәстүрлі агротехникалық шаралардың тиімділігі төмендеп, экожүйеге бейімделген биологиялық тәсілдерге сұраныс артады. Галофитті өсімдіктер осы тұрғыда климаттық тұрақтылыққа ие фиторемедиациялық агенттер ретінде қарастырылады, себебі олар жоғары температура мен су тапшылығына бір мезгілде төзімді (Flowers & Colmer, 2021).

Бірқатар модельдік зерттеулер галофиттердің климаттық стресс жағдайында да биомасса түзу қабілетін сақтайтынын көрсетеді. Бұл қасиет фиторемедиацияның болашақта да тиімді болуын қамтамасыз ететін маңызды фактор болып табылады. Сонымен қатар, галофиттер топырақ бетінде өсімдік жамылғысын қалыптастыру арқылы микроклиматты тұрақтандырып, булануды азайтады және тұздардың қайта көтерілуін шектейді (Hasanuzzaman et al., 2020).

Қазақстан жағдайында климаттың өзгеруіне бейімделу стратегиялары аясында галофиттерді қолдану экологиялық бейімделу (adaptation) шараларының құрамдас бөлігі ретінде қарастырылуы мүмкін. Әсіресе Арал маңы, Каспий маңы ойпаты және оңтүстік өңірлерде галофиттерді енгізу климаттық тәуекелдерді төмендетуге бағытталған табиғи шешімдер (nature-based solutions) қатарына жатады.

Фиторемедиацияны экожүйелік қызметтер тұрғысынан бағалау

Фиторемедиацияның тиімділігі көбінесе ластаушы заттардың концентрациясының төмендеуімен бағаланады, алайда бұл әдістің экожүйелік қызметтерге тигізетін кең ауқымды әсері де ескерілуі тиіс. Галофитті өсімдіктерді қолдану топырақтың тек химиялық күйін ғана емес, сонымен қатар оның экожүйелік функцияларын қалпына келтіруге ықпал етеді.

Галофиттер органикалық қалдықтардың жиналуын арттыру арқылы топырақтың көміртек қорын толықтырады. Бұл процесс көміртекті секвестрлеуге ықпал етіп, климаттың өзгеруін тежеуге бағытталған қосымша экожүйелік пайда береді. Сонымен қатар, тамыр жүйесінің дамуы

топырақ құрылымын тұрақтандырып, жел және су эрозиясын төмендетеді (FAO, 2021; Lal, 2020).

Экожүйелік тұрғыдан алғанда галофиттер биоәртүрліліктің бастапқы қалпына келуін қамтамасыз ететін «пионерлік» өсімдіктер ретінде әрекет етеді. Олар деградацияланған аумақтарда тіршілікке қолайлы жағдай қалыптастырып, кейінгі сукцессиялық кезеңдерде басқа өсімдік түрлерінің орнығуына жағдай жасайды. Бұл қасиет фиторемедиацияны қысқа мерзімді тазарту әдісінен экожүйені ұзақ мерзімді қалпына келтіру құралына айналдырады.

Фиторемедиацияның экономикалық және басқарушылық аспектілері

Галофитті өсімдіктерге негізделген фиторемедиацияның тағы бір маңызды қыры – оның экономикалық және басқарушылық тиімділігі. Дәстүрлі инженерлік мелиорация әдістерімен салыстырғанда фиторемедиация салыстырмалы түрде төмен қаржылық шығынды талап етеді және кең аумақтарды қамтуға мүмкіндік береді.

Экономикалық бағалаулар көрсеткендей, фиторемедиация әсіресе төмен және орташа деңгейде ластанған аумақтарда тиімді болып табылады. Бұл әдіс күрделі техникалық инфрақұрылымды қажет етпейді және жергілікті өсімдік ресурстарын пайдалануға негізделеді. Қазақстан жағдайында бұл фактор фиторемедиацияны аймақтық даму бағдарламаларына енгізуге қолайлы етеді (Levina & Serikbayeva, 2020).

Фиторемедиацияны басқа қалпына келтіру әдістерімен интеграциялау

Тұзданған және ауыр металдармен ластанған топырақтарды қалпына келтіру тәжірибесінде фиторемедиация көбінесе жеке әдіс ретінде емес, кешенді экологиялық шаралардың құрамдас бөлігі ретінде қарастырылады. Соңғы зерттеулер фиторемедиацияны инженерлік, химиялық және микробиологиялық әдістермен үйлестіру оның тиімділігін айтарлықтай арттыра алатынын көрсетеді. Мұндай интеграцияланған тәсілдер ластанған аумақтардың әртүрлі экологиялық ерекшеліктерін ескеруге мүмкіндік береді (Qadir et al., 2014).

Инженерлік мелиорациямен үйлестіру ең кең таралған бағыттардың бірі болып табылады. Дренаж жүйелерін жетілдіру, топырақтың су режимін реттеу және жер бедерін оңтайландыру фиторемедиация үшін қолайлы жағдай қалыптастырады. Галофитті өсімдіктер мұндай жүйелерде биологиялық тұрақтандырушы рөл атқарып, тұздардың қайта көтерілуін шектейді және топырақтың физикалық құрылымын сақтауға ықпал етеді. Бұл тәсіл әсіресе суармалы егіншілік аймақтарында тиімді болып саналады (Rengasamy, 2016).

Химиялық мелиоранттармен бірге қолдану да кейбір жағдайларда оң нәтиже береді. Гипс, фосфогипс немесе органикалық қоспалар топырақтағы натрий иондарының алмасуын жеделдетіп, галофиттердің тамыр жүйесі арқылы тұздарды сіңіруін жеңілдетеді. Алайда химиялық мелиоранттарды қолдану экологиялық тәуекелдермен байланысты болғандықтан, оларды фиторемедиациямен бірге шектеулі және бақылаулы түрде пайдалану ұсынылады (Alloway, 2013).

Микробиологиялық ремедиациямен интеграциялау соңғы жылдары ерекше назар аударып отыр. Топырақ микроағзалары ауыр металдардың биоәртүрлілігіне және тұздардың миграциясына тікелей әсер етеді. Галофиттердің ризосферасында дамиды бактериялар мен саңырауқұлақтар ауыр металдарды байланыстырып немесе олардың өсімдікке сіңуін жеңілдетуі мүмкін. Бұл өзара әрекет фиторемедиацияның тиімділігін арттыратын қосымша фактор ретінде қарастырылады (Tangahu et al., 2011; Rajkumar et al., 2020).

Ұзақ мерзімді мониторинг және бағалау қажеттілігі

Фиторемедиацияның тиімділігін бағалау тек қысқа мерзімді көрсеткіштермен шектелмеуі тиіс. Ұзақ мерзімді мониторинг топырақтың физика-химиялық қасиеттеріндегі өзгерістерді, ауыр металдардың миграциясын және экожүйелік қызметтердің қалпына келуін бағалауға мүмкіндік береді. Бірнеше вегетациялық кезеңді қамтитын зерттеулер ғана фиторемедиацияның тұрақты нәтижелерін анықтай алады (FAO, 2021; Alloway, 2013).

Ұзақ мерзімді бақылаулар галофиттерді қолданудың кейбір жанама әсерлерін де анықтауға мүмкіндік береді. Мысалы, топырақта белгілі бір иондардың қайта жиналуы немесе өсімдік қауымдастықтарының құрылымдық өзгерістері уақыт өте келе байқалуы мүмкін. Сондықтан мониторинг бағдарламалары топырақ химиясымен қатар биологиялық және экожүйелік көрсеткіштерді де қамтуы тиіс (Flowers & Colmer, 2021).

Қазақстан жағдайында ұзақ мерзімді мониторинг әсіресе маңызды, себебі климаттық

жағдайлардың құбылмалылығы фиторемедиация нәтижелеріне тікелей әсер етеді. Құрғақ жылдары өсімдік биомассасының төмендеуі байқалса, ылғалды жылдары тұздарды сіңіру қарқындылығы артуы мүмкін. Бұл факторларды ескеру фиторемедиация стратегияларын бейімдеуге мүмкіндік береді (Baibekova & Sarsekova, 2021).

Фиторемедиацияның әлеуметтік-экологиялық аспектілері

Фиторемедиацияны енгізу тек экологиялық емес, әлеуметтік аспектілерді де қамтиды. Деградацияланған жерлердің қалпына келтірілуі жергілікті қауымдастықтардың өмір сүру сапасына, ауыл шаруашылығының дамуына және экологиялық қауіпсіздікке оң әсер етеді. Қазақстанның кейбір өңірлерінде тұзданған жерлердің кең таралуы ауыл шаруашылығы өндірісінің шектелуіне және экономикалық шығындарға алып келіп отыр.

Галофиттерді қолдану арқылы қалпына келтірілген аумақтар жайылым ретінде немесе шектеулі ауыл шаруашылығы мақсатында қайта пайдаланылуы мүмкін. Бұл жергілікті халық үшін қосымша экономикалық мүмкіндік туғызады және табиғи ресурстарды тұрақты пайдалану қағидаттарына сәйкес келеді (Levina & Serikbayeva, 2020).

Сонымен қатар, фиторемедиация жобалары экологиялық білім беру және қоғамның экологиялық санасын арттыру тұрғысынан да маңызды. Деградацияланған жерлерде жүргізілген табысты қалпына келтіру жобалары экожүйелердің қалпына келу мүмкіндігін көрсетіп, табиғатты қорғау бастамаларына деген сенімді арттырады.

Тұздану мен ауыр металдармен ластанудың өзара байланысы

Топырақтың тұздануы мен ауыр металдармен ластануы көптеген өңірлерде бір-бірімен тығыз байланысты үдерістер ретінде қарастырылады. Аридті және жартылай аридті аймақтарда тұздардың жиналуы топырақтың физика-химиялық қасиеттерін өзгертіп, ауыр металдардың миграциясы мен биожетімділігіне тікелей әсер етеді. Жоғары тұздылық жағдайында топырақ ерітіндісінің иондық құрамы өзгеріп, кейбір ауыр металдардың қозғалғыш формаларының үлесі артуы мүмкін (Alloway, 2013).

Зерттеулер көрсеткендей, тұзданған топырақтарда натрий мен хлор иондарының жоғары концентрациясы ауыр металдардың сорбциясын әлсіретіп, олардың топырақ ерітіндісіне өтуін жеңілдетеді. Бұл құбылыс әсіресе кадмий мен мырыш үшін тән болып табылады, себебі олар тұзды ортада салыстырмалы түрде жоғары қозғалғыштыққа ие (Li et al., 2021). Нәтижесінде тұздану ауыр металдармен ластанудың экологиялық қаупін күшейтетін қосымша фактор ретінде әрекет етеді.

Көптеген өнеркәсіптік және тау-кен аймақтарында бұл екі фактор бір мезгілде байқалады. Суармалы егіншілік дамыған өңірлерде тұздану ирригациялық жүктеменің нәтижесі болса, ауыр металдар атмосфералық тұнбалар, өндірістік қалдықтар және қалдық сулар арқылы топыраққа түседі. Мұндай кешенді ластану жағдайында топырақтың өзін-өзі қалпына келтіру қабілеті айтарлықтай төмендейді (Woszczyk et al., 2018).

Кешенді ластанған топырақтарда фиторемедиацияның ерекшеліктері

Тұздар мен ауыр металдар бір мезгілде әсер ететін топырақтарды қалпына келтіру дәстүрлі әдістер үшін ерекше қиындық тудырады. Химиялық немесе инженерлік мелиорация тәсілдері көбінесе бір ғана факторға бағытталып, кешенді ластануды толық шешуге қабілетсіз болады. Осы тұрғыда галофитті өсімдіктердің экологиялық артықшылығы айқын көрінеді, себебі олар жоғары тұздылыққа төзімді болумен қатар ауыр металдарды сіңіру қабілетіне ие. Галофиттер кешенді ластанған ортада екі функцияны қатар атқарады: тұз иондарын биомассада жинақтау және ауыр металдардың биожетімді формаларын азайту. Бұл қасиет олардың физиологиялық бейімделу жүйелерінің кеңдігімен түсіндіріледі (Qadir et al., 2014; Li et al., 2021; Wang et al., 2021). Тұз стресіне жауап беретін иондық реттеу механизмдері ауыр металдарға төзімділік жүйелерімен өзара байланыста жұмыс істейді, нәтижесінде өсімдіктер күрделі геохимиялық жағдайларда да тіршілік ете алады (Flowers & Colmer, 2021).

Эксперименттік деректер көрсеткендей, кешенді ластанған топырақтарда *Salicornia europaea* және *Suaeda spp.* өсімдіктері тұздану деңгейін төмендетумен қатар Pb және Cd элементтерінің жылжымалы фракцияларын тұрақтандыра алады. Бұл жағдайда ауыр металдардың басым бөлігі тамыр аймағында немесе вакуольдерде оқшауланып, топырақ-өсімдік жүйесінде қайта таралуы шектеледі (Khalilzadeh et al., 2021).

Тұздану ауыр металдардың фитотазартылуына әсер ететін фактор ретінде

Тұзданудың фиторемедиацияға әсері біржақты емес. Кейбір жағдайларда тұздардың жоғары концентрациясы ауыр металдардың өсімдікке сіңуін бәсеңдетсе, басқа жағдайларда керісінше олардың қозғалғыштығын арттыруы мүмкін. Бұл айырмашылық топырақтың минералогиялық құрамына, тұздардың түріне және ауыр металдардың химиялық формасына байланысты (Rajkumar et al., 2020).

Натрий хлоридімен басым тұзданған топырақтарда кадмий мен мырыштың ерігіштігі артып, өсімдіктерге қолжетімділігі жоғарылайды. Ал сульфатты немесе карбонатты тұздану жағдайында кейбір ауыр металдар тұнбаға түсіп, фитотазартудың тиімділігі төмендеуі мүмкін. Осы себепті кешенді ластанған топырақтарда фиторемедиация нәтижелерін бағалау кезінде тұзданудың типі міндетті түрде ескерілуі тиіс (Li et al., 2021).

Ауыр металдардың тұзданған топырақтардағы экологиялық сипаты

Тұзданған топырақтарда ауыр металдардың экологиялық сипаты бейтарап немесе бейтарапқа жақын топырақтармен салыстырғанда едәуір ерекшеленеді. Тұздардың жоғары концентрациясы топырақ ерітіндісінің иондық күшін арттырып, ауыр металдардың сорбция–десорбция тепе-теңдігін өзгертеді. Нәтижесінде кейбір металдар коллоидты бөлшектермен әлсіз байланысып, топырақ ерітіндісінде жылжымалы күйде сақталуы мүмкін (Alloway, 2013).

Аридті аймақтарда байқалатын бұл құбылыс ауыр металдардың өсімдік тамыр аймағына ену ықтималдығын арттырады. Әсіресе кадмий мен мырыш тұзды ортада салыстырмалы түрде жоғары миграциялық қабілетке ие, ал қорғасын көбіне топырақтың жоғарғы қабаттарында жиналып, жел эрозиясы арқылы екінші реттік таралу көзіне айналуы мүмкін (Li et al., 2021). Бұл жағдай тұзданған аймақтарда ауыр металдардың экологиялық тәуекелін күшейтеді.

Сонымен қатар, тұздану топырақтағы микроағзалардың белсенділігіне әсер етіп, ауыр металдардың биогеохимиялық айналымын жанама түрде өзгертеді. Топырақ микробиотасының әлсіреуі металдардың органикалық заттармен байланысуын шектеп, олардың биожетімді формаларының үлесін арттыруы мүмкін. Мұндай жағдайларда фиторемедиация биологиялық реттеу құралы ретінде ерекше маңызға ие болады (Rajkumar et al., 2020).

Галофиттердің ауыр металдармен ластанған ортаға бейімделуінің экологиялық салдары

Галофитті өсімдіктердің ауыр металдармен ластанған ортада өмір сүру қабілеті олардың тек физиологиялық төзімділігімен ғана емес, экожүйелік рөлімен де байланысты. Галофиттер ластанған аумақтарда өсімдік жамылғысын қалыптастырып, топырақ бетінің ашық қалуын азайтады. Бұл жел және су эрозиясын шектеу арқылы ауыр металдардың кеңістіктік таралуын төмендетеді. Экожүйелік тұрғыдан галофиттер ауыр металдармен ластанған топырақтарда «буферлік» функция атқарады. Олар металдардың бір бөлігін биомассада жинақтап, топырақ–су жүйесіне өтуін шектейді. Бұл әсіресе жер үсті және жерасты суларының ластану қаупі жоғары аймақтарда маңызды болып табылады. Галофиттердің мұндай қызметі фиторемедиацияны тек тазарту әдісі ретінде емес, экожүйелік қауіптерді басқару құралы ретінде қарастыруға мүмкіндік береді (Ashraf et al., 2020).

Кейбір зерттеулерде галофиттер өскен аумақтарда ауыр металдардың өсімдікке қолжетімді формаларының азаюымен қатар, топырақтың құрылымдық тұрақтылығының артқаны көрсетілген. Бұл әсер тамыр жүйесінің топырақ агрегаттарын бекітуімен және органикалық қалдықтардың жиналуымен байланыстырылады. Осылайша галофиттер ластанған топырақтарда ұзақ мерзімді тұрақтандырушы фактор ретінде әрекет етеді (Hasanuzzaman et al., 2020).

Тұздар және ауыр металдармен кешенді ластану жағдайында фиторемедиация тиімділігін бағалау

Тұздар мен ауыр металдар бір мезгілде әсер ететін топырақтарда фиторемедиация тиімділігін бағалау тек химиялық көрсеткіштермен шектелмеуі тиіс. Мұндай жағдайларда топырақтың физикалық қасиеттері, биологиялық белсенділігі және экожүйелік функциялары да ескерілуі қажет. Галофиттерді қолдану нәтижесінде алынған оң әсерлер көбінесе кешенді сипатқа ие болып, бірнеше экологиялық параметрлердің бір мезгілде жақсаруымен көрінеді.

Кейбір жағдайларда тұздардың болуы ауыр металдардың фитосіңірілуін тежесе, басқа жағдайларда керісінше фиторемедиация процесін жеделдетуі мүмкін. Бұл айырмашылық өсімдік

түріне, тұздану типіне және металдардың химиялық формасына байланысты. Сондықтан кешенді ластанған аумақтарда бір ғана көрсеткішке сүйеніп қорытынды жасау фиторемедиацияның нақты тиімділігін бұрмалауы мүмкін (Li et al., 2021).

Қазақстан аумағында бұл мәселе ерекше өзекті, себебі тұздану типтері мен ауыр металдардың көздері аймақтан аймаққа айтарлықтай өзгереді. Осыған байланысты фиторемедиация жобаларын жоспарлау кезінде кешенді экологиялық бағалау жүргізу және аймақтық ерекшеліктерді ескеру қажет.

Ауыр металдармен ластанған топырақтарды фитотазартудағы экологиялық шектеулер мен белгісіздіктер

Ауыр металдармен ластанған топырақтарды фитотазарту үдерісі бірқатар экологиялық және геохимиялық шектеулермен сипатталады. Галофитті өсімдіктердің жоғары төзімділігіне қарамастан, ауыр металдардың топырақтағы химиялық формасы, байланысу дәрежесі және миграциялық қабілеті фиторемедиация нәтижелеріне тікелей әсер етеді. Кейбір жағдайларда металдар минералдық фазаға берік байланысып, өсімдікке қолжетімсіз күйде сақталуы мүмкін, бұл фитотазартудың тиімділігін төмендетеді (Alloway, 2013). Ауыр металдардың өсімдікке сіңірілуі көбінесе топырақ ерітіндісінің рН мәніне, тұздану типіне және органикалық заттардың мөлшеріне тәуелді. Сілтілі ортада қорғасын мен мыс сияқты элементтер көбінесе тұнбаға түсіп, фитосіңіру үшін қиын қолжетімді формада болады. Ал кадмий мен мырыш бейтарап және әлсіз сілтілі жағдайда да салыстырмалы түрде қозғалғыш болып қала береді (Li et al., 2021). Осы айырмашылықтар галофиттердің ауыр металдармен ластанған топырақтардағы тиімділігін бағалауда ескерілуі тиіс. Тағы бір маңызды фактор – ауыр металдардың өсімдік мүшелері бойынша таралуы. Көптеген галофит түрлерінде ауыр металдар негізінен тамыр жүйесінде жинақталып, жер үсті мүшелеріне шектеулі мөлшерде ғана тасымалданады. Бұл жағдай экожүйелік қауіптерді төмендеткенімен, ластаушы заттарды жүйеден толық шығару тұрғысынан фитостабилизацияның басым болуына алып келеді (Manousaki & Kalogerakis, 2011). Сондықтан фиторемедиацияның мақсатына байланысты өсімдік түрін және қолдану стратегиясын нақты анықтау қажет. Ауыр металдармен ластанған аумақтарда өсімдіктердің өсуі климаттық факторларға да тәуелді. Құрғақ жылдары галофиттердің биомасса түзу қабілеті төмендеп, нәтижесінде жинақталатын ауыр металдардың жалпы мөлшері азаюы мүмкін. Ал ылғалды кезеңдерде металдардың миграциясы артып, фитосіңіру қарқыны жоғарылайды. Бұл құбылмалылық фиторемедиация нәтижелерінің жыл сайын өзгеруіне әкелуі мүмкін және ұзақ мерзімді мониторингтің маңыздылығын арттырады (Flowers & Colmer, 2021).

Ауыр металдармен ластанған топырақтарды басқаруда галофиттердің рөлі

Фиторемедиацияны ауыр металдармен ластанған топырақтарды басқарудың жалғыз әдісі ретінде емес, экологиялық тәуекелдерді төмендету жүйесінің бір бөлігі ретінде қарастырған жөн. Галофиттер ластаушы заттарды толық жоюдан гөрі, олардың биожетімділігін төмендету және экожүйе компоненттеріне таралуын шектеу функциясын тиімді атқарады. Бұл тәсіл әсіресе ірі өнеркәсіптік аймақтар мен тау-кен өндірісі жүріп жатқан өңірлерде өзекті болып табылады. Қазақстан жағдайында ауыр металдармен ластанған көптеген аумақтарда топырақты толық алып тастау немесе химиялық өңдеу экономикалық және экологиялық тұрғыдан тиімсіз. Мұндай жағдайда галофиттерге негізделген биологиялық тұрақтандыру ұзақ мерзімді және салыстырмалы түрде арзан шешім ретінде қарастырылады. Галофиттер топырақ бетін жауып, шаңның көтерілуін азайтады, осылайша ауыр металдардың атмосфера арқылы таралу қаупін төмендетеді (Woszczyk et al., 2018).

Сонымен қатар, галофиттердің қолданылуы жер пайдаланудың экологиялық режимін өзгертуге мүмкіндік береді. Ластанған аумақтарды толықтай пайдаланудан шығару орнына, оларды бақылаулы экожүйелер ретінде сақтау және қауіптілігін төмендету стратегиясы іске асырылады. Бұл тәсіл экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз етумен қатар, жер ресурстарын басқарудың икемді моделін ұсынады.

Ауыр металдармен ластанған топырақтарда фиторемедиацияның аймақтық ерекшеліктері

Дүниежүзілік тәжірибе көрсеткендей, ауыр металдармен ластанған топырақтарды фитотазартудың тиімділігі аймақтық ерекшеліктерге байланысты айтарлықтай өзгереді. Теңіз

жағалауы мен өзен атырауларына тән тұзды-батпақты экожүйелерде галофиттердің ауыр металдарды жинақтау қабілеті жоғарырақ байқалады, себебі бұл аймақтарда тұздану мен металдардың миграциясы табиғи түрде қатар жүреді (Flowers & Colmer, 2021).

Құрлықтың ішкі бөліктеріндегі аридті аймақтарда, соның ішінде Қазақстан аумағында, ауыр металдардың негізгі бөлігі техногендік көздерден түседі. Мұнда металдардың таралуы жел эрозиясымен, өндірістік қалдықтармен және қалдық сулармен тығыз байланысты. Мұндай жағдайда галофиттерді қолдану фиторемедиациядан бөлек, экожүйелік қорғау функциясын да атқарады.

Қазақстандық зерттеулер көрсеткендей, жергілікті галофит түрлері климаттық стресс жағдайларына жақсы бейімделген және ұзақ уақыт бойы тұрақты өсімдік жамылғысын сақтай алады. Бұл қасиет ауыр металдармен ластанған аумақтарда фиторемедиацияның үздіксіз жүруін қамтамасыз ететін негізгі факторлардың бірі болып табылады (Levina & Serikbayeva, 2020).

Фиторемедиация нәтижелерін интерпретациялаудағы әдістемелік аспектілер

Ауыр металдармен ластанған топырақтарда фиторемедиация нәтижелерін бағалау кезінде қолданылатын әдістемелер де маңызды рөл атқарады. Өртүрлі зерттеулерден алынған нәтижелерді салыстыру кейде қиындық тудырады, себебі қолданылатын көрсеткіштер, сынама алу тереңдігі және бағалау критерийлері әртүрлі болуы мүмкін. Мысалы, кейбір жұмыстарда ауыр металдардың жалпы концентрациясы бағаланса, басқаларында тек жылжымалы немесе биожетімді фракциялар ескеріледі (Amin et al., 2020).

Фиторемедиация тиімділігін дұрыс интерпретациялау үшін ауыр металдардың экологиялық қауіпті формаларына басымдық беру қажет. Өсімдіктермен сіңірілген немесе тұрақтандырылған металдардың экожүйеге нақты әсері олардың жалпы мөлшерінен гөрі биожетімділігімен анықталады. Осы тұрғыда галофиттердің ауыр металдардың қозғалғыш фракцияларын төмендету қабілеті ерекше маңызға ие.

Ауыр металдармен ластанған топырақтарды қалпына келтіру стратегияларындағы галофиттердің болашағы

Ауыр металдармен ластанған топырақтарды қалпына келтіру ұзақ мерзімді және көпсатылы экологиялық міндет болып табылады. Қазіргі таңда қолданылатын инженерлік және химиялық әдістер жоғары қаржылық шығынды, экожүйеге қосымша қысым түсіруді және кей жағдайларда екінші реттік ластануды тудыруы мүмкін. Осы тұрғыда галофитті өсімдіктерге негізделген фиторемедиация болашақта экологиялық тұрғыдан тұрақты стратегиялардың бірі ретінде қарастырылады.

Галофиттердің басты артықшылығы – олардың экстремалды жағдайларда да тіршілік ету қабілеті және ауыр металдар мен тұздардың бірлескен әсеріне төзімділігі. Бұл қасиет оларды дәстүрлі өсімдіктер өсе алмайтын аумақтарда қолдануға мүмкіндік береді. Әсіресе ұзақ уақыт бойы өнеркәсіптік әсерге ұшыраған, бірақ толық рекультивация жүргізу экономикалық тұрғыдан тиімсіз аумақтар үшін галофиттерге негізделген тәсілдер тиімді балама бола алады (Flowers & Colmer, 2021). Болашақта галофиттерді қолдану бір реттік тазарту шарасы ретінде емес, экожүйені басқарудың бейімделмелі жүйесі ретінде дамуы мүмкін. Бұл жүйеде галофиттер топырақтағы ауыр металдардың миграциясын бақылау, экожүйелік тұрақтылықты сақтау және қоршаған ортаға төнетін тәуекелдерді азайту функцияларын атқарады. Мұндай тәсіл экожүйелердің табиғи өзін-өзі қалпына келтіру қабілетін қолдап, антропогендік жүктемені біртіндеп төмендетуге мүмкіндік береді.

Қазақстан жағдайында ауыр металдармен ластанған аумақтарды басқару перспективалары

Қазақстан аумағында ауыр металдармен ластанған топырақтардың басым бөлігі металлургия, тау-кен және энергетика салаларымен байланысты. Бұл аумақтарда ластану көбінесе созылмалы сипатқа ие болып, ондаған жылдар бойы жинақталған ауыр металдар экожүйелерге тұрақты қысым түсіреді. Мұндай жағдайларда топырақты толық тазарту қысқа мерзімде мүмкін емес, сондықтан тәуекелдерді басқаруға бағытталған биологиялық тәсілдер ерекше маңызға ие. Галофиттерді қолдану Қазақстан жағдайында бірнеше стратегиялық артықшылыққа ие. Біріншіден, көптеген галофит түрлері жергілікті флорада табиғи түрде кездеседі немесе аймақтық климатқа жақсы бейімделген. Бұл оларды енгізу кезінде экожүйеге

бөгде түрлердің әсерін азайтады. Екіншіден, галофиттер су тапшылығы жағдайында да салыстырмалы түрде тұрақты биомасса түзе алады, бұл құрғақ аймақтар үшін маңызды фактор болып табылады (Baibekova & Sarsekova, 2021). Қазақстанның өнеркәсіптік өңірлерінде галофиттерді қолдану тек фиторемедиация мақсатында ғана емес, санитарлық-қорғаныш аймақтарын қалыптастыру үшін де қарастырылуы мүмкін. Өсімдік жамылғысы топырақ бетін бекітіп, ауыр металдармен байытылған шаңның таралуын шектейді. Бұл әсіресе халық тығыз орналасқан өнеркәсіптік қалалар маңында экологиялық қауіпсіздікті арттыруға мүмкіндік береді (Woszczyk et al., 2018).

Фиторемедиацияның ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ету

Фиторемедиацияның табысты болуы тек өсімдіктердің ауыр металдарды сіңіру қабілетіне ғана емес, оның ұзақ мерзімді тұрақтылығына да байланысты. Галофиттер бірнеше вегетациялық кезең бойы қолданылған жағдайда топырақтың тұздық және техногендік жүктемесі біртіндеп төмендейді, алайда бұл процесс баяу жүреді және тұрақты бақылауды талап етеді. Ұзақ мерзімді тұрақтылықты қамтамасыз ету үшін фиторемедиация бағдарламалары экологиялық мониторинг жүйелерімен біріктірілуі тиіс. Бұл жүйелер топырақтағы ауыр металдардың биожетімді фракцияларын, өсімдік биомассасындағы жиналу динамикасын және экожүйелік көрсеткіштердің өзгерісін бақылауға мүмкіндік береді. Мұндай деректер фиторемедиация стратегияларын уақытында түзетуге және олардың тиімділігін арттыруға негіз болады (FAO, 2021). Сонымен қатар, галофиттердің ұзақ уақыт бойы монокультура түрінде қолданылуы экожүйелік әртүрлілікке кері әсер етуі мүмкін. Осыған байланысты болашақта галофиттерді басқа төзімді өсімдік түрлерімен біріктіріп, көптүрлі өсімдік қауымдастықтарын қалыптастыру ұсынылады. Бұл тәсіл экожүйенің тұрақтылығын арттырып, фиторемедиацияның экологиялық әсерін кеңейтеді (Hasanuzzaman et al., 2020).

Ғылыми және қолданбалы зерттеулердің басым бағыттары

Ауыр металдармен және тұздармен ластанған топырақтарды фитотазарту саласындағы болашақ зерттеулер бірнеше негізгі бағытқа шоғырлануы тиіс. Бірінші бағыт – галофиттердің әртүрлі ауыр металдарға жауап реакцияларын нақты экологиялық жағдайларда зерттеу. Бұл әсіресе кешенді ластанған топырақтарда өсімдіктердің бейімделу шектерін анықтауға мүмкіндік береді. Екінші бағыт – далалық жағдайда ұзақ мерзімді тәжірибелер жүргізу. Зертханалық және вегетациялық тәжірибелер көптеген маңызды мәліметтер бергенімен, олар табиғи ортадағы күрделі өзара әрекеттерді толық көрсете алмайды. Сондықтан әртүрлі климаттық аймақтарда орналасқан пилоттық алаңдарда галофиттерді қолдану тәжірибесін кеңейту қажет (Rajkumar et al., 2020). Үшінші бағыт – фиторемедиацияның әлеуметтік және экономикалық аспектілерін бағалау. Галофиттерді қолдану жергілікті қауымдастықтарға қандай пайда әкелетіні, жер ресурстарын пайдалануға қалай әсер ететіні және ұзақ мерзімді экологиялық тәуекелдерді қалай төмендететіні жүйелі түрде зерттелуі тиіс. Бұл деректер фиторемедиацияны мемлекеттік және аймақтық экологиялық бағдарламаларға енгізу үшін ғылыми негіз қалыптастырады.

Қазіргі кезеңдегі шектеулер және оларды еңсеру жолдары

Галофиттерге негізделген фиторемедиацияның перспективаларына қарамастан, бұл әдістің белгілі бір шектеулері бар. Ең алдымен, фиторемедиация жылдам нәтиже беретін технология емес және ол уақыт факторына тәуелді. Бұл ерекшелік оны жедел экологиялық апат жағдайларында қолдануды шектейді. Сонымен қатар, ауыр металдармен байытылған өсімдік биомассасын басқару мәселесі толық шешілмеген. Биомассаны қауіпсіз кәдеге жарату немесе залалсыздандыру әдістері әр аймақта әртүрлі болуы мүмкін және қосымша зерттеуді талап етеді. Осы шектеулерді еңсеру үшін фиторемедиацияны басқа экологиялық әдістермен үйлестіріп қолдану ұсынылады (Ali et al., 2013).

Фиторемедиация тиімділігін бағалаудағы тәуекелдер және шешім қабылдау аспектілері

Ауыр металдар және тұздармен ластанған топырақтарды фитотазартуда алынған нәтижелерді интерпретациялау кезінде экологиялық тәуекелдер мен белгісіздіктерді ескеру ерекше маңызды. Фиторемедиация көпфакторлы процесс болғандықтан, оның тиімділігі бір ғана көрсеткішпен сипатталмайды. Топырақтағы ауыр металдардың жалпы концентрациясының төмендеуі әрқашан экожүйелік қауіптің азаюын білдірмейді, себебі металдардың биожетімділігі

мен миграциялық қабілеті шешуші рөл атқарады. Тәуекелдерді бағалау тұрғысынан галофитті өсімдіктердің басты артықшылығы – олардың ауыр металдарды биомассада жинақтап қана қоймай, топырақтағы қозғалғыш фракцияларды тұрақтандыру қабілеті. Бұл қасиет ауыр металдардың жерасты суларына немесе қоректік тізбектерге өту қаупін төмендетеді. Алайда фиторемедиация нәтижесінде жиналған ауыр металдардың экожүйеден толық шығарылуы әрдайым мүмкін бола бермейді, сондықтан бұл әдіс көбіне тәуекелді басқару құралы ретінде қарастырылуы тиіс. Шешім қабылдау процесінде фиторемедиацияның уақытша ауқымы да ескерілуі қажет. Қысқа мерзімді кезеңде айтарлықтай өзгерістер байқалмауы мүмкін, ал ұзақ мерзімді қолдану барысында экожүйелік көрсеткіштердің біртіндеп жақсаруы тіркеледі. Осыған байланысты фиторемедиация жобаларын жоспарлау кезінде кезеңдік мақсаттар белгілеу және аралық нәтижелерді бағалау маңызды болып табылады. Қазақстан жағдайында бұл аспектілер ерекше мәнге ие, себебі көптеген ластанған аумақтар ұзақ уақыт бойы антропогендік әсерге ұшыраған. Мұндай өңірлерде фиторемедиацияны толық қалпына келтіру әдісі ретінде емес, экологиялық тәуекелдерді төмендетуге және жер ресурстарын басқаруға бағытталған бейімделмелі тәсіл ретінде қарастыру орынды. Бұл тәсіл экожүйелердің біртіндеп қалпына келуіне жағдай жасап, күрделі инженерлік араласулардың қажеттілігін азайтады.

Сонымен қатар, фиторемедиация тиімділігін арттыру үшін ғылыми деректерді жер пайдалану саясаты және экологиялық жоспарлау жүйелерімен үйлестіру қажет. Галофиттерді қолдану арқылы алынған нәтижелер аймақтық деңгейде жинақталып, ластанған аумақтарды басқару стратегияларын әзірлеуде пайдаланылуы мүмкін. Бұл фиторемедиацияны жекелеген тәжірибелер шеңберінен шығарып, оны тұрақты экологиялық басқару тетігінің бір бөлігіне айналдыруға мүмкіндік береді. Осылайша, галофитті өсімдіктерге негізделген фитотазарту әдісі ауыр металдар және тұздармен ластанған топырақтарды қалпына келтіруде тек биологиялық құрал ғана емес, экологиялық тәуекелдерді басқарудың кешенді элементі ретінде қарастырылады. Бұл тұжырым зерттеудің қорытынды бөлімінде ұсынылатын жалпы нәтижелер мен практикалық ұсыныстарға логикалық негіз қалайды.

3. Қорытынды

1. Тұзданған және ауыр металдармен ластанған топырақтардың кең таралуы аридті және жартылай аридті аймақтар үшін, соның ішінде Қазақстан аумағында, маңызды экологиялық проблема болып табылады. Бұл үдерістер табиғи-климаттық факторлармен қатар суармалы егіншілік, өнеркәсіп және тау-кен өндірісі сияқты антропогендік әсерлердің нәтижесінде күшейіп, экожүйелердің деградациясына және жер ресурстарының өнімділігінің төмендеуіне алып келеді.

2. Дүниежүзілік тәжірибе галофитті өсімдіктердің жоғары тұздылық жағдайларына физиологиялық тұрғыдан бейімделгенін және Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} иондарын биомассада жинақтай алатынын көрсетеді. Бұл қасиеттер галофиттерді тұзданған топырақтарды фитотазарту мен биологиялық тұрақтандырудың экологиялық тұрғыдан қауіпсіз құралы ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

3. Ауыр металдармен (Pb, Cd, Zn, Cu) ластанған топырақтарда галофитті өсімдіктердің қолданылуы ауыр металдардың жылжымалы және биожетімді формаларын төмендетуге ықпал етеді. Галофиттер металдарды тамыр аймағында және жасушаішілік құрылымдарда оқшаулау арқылы олардың топырақ-су жүйесінде таралуын шектеп, экожүйелік тәуекелдерді азайтады.

4. Тұздану мен ауыр металдармен ластану көп жағдайда бір мезгілде байқалатын кешенді үдерістер болып табылады. Мұндай жағдайда галофиттердің экологиялық артықшылығы айқын көрінеді, себебі олар тұз стресіне төзімділік пен ауыр металдарға бейімделу механизмдерін қатар іске асыра отырып, күрделі геохимиялық ортада тұрақты өсімдік жамылғысын қалыптастыра алады.

5. Қазақстан аумағында галофитті өсімдіктерді қолдану үшін экологиялық тұрғыдан қолайлы аймақтар жеткілікті. Арал маңы, Каспий маңы ойпаты, сондай-ақ өнеркәсіптік және тау-кен өндірісі дамыған өңірлерде галофиттерге негізделген фиторемедиация деградацияланған жерлерді қалпына келтірудің перспективті биологиялық бағыты болып табылады.

6. Галофиттерге негізделген фиторемедиация ауыр металдар және тұздармен ластанған топырақтарды толық тазартудан гөрі, экологиялық тәуекелдерді төмендету мен экожүйелік тұрақтылықты қамтамасыз етуге бағытталған әдіс ретінде қарастырылуы тиіс. Бұл тәсіл жер ресурстарын басқару, экологиялық жоспарлау және тұрақты даму стратегияларымен үйлестірілген жағдайда ең жоғары тиімділікке қол жеткізуге мүмкіндік береді.

4. Қосымша материалдар: Қосымша материалдар берілген жоқ

5. Авторлық үлестер:

Концептуализация - Ж.Р., Р.М.; әдістемесі - А.Қ.; валидация - А.Қ., Ж.Р., Р.М.; формалды талдау - Ж.Р.; зерттеу - А.Қ.; ресурстар - Р.М.; деректерді өңдеу - А.Қ., Ж.Р.; жазу - түпнұсқа жобасын дайындау - А.Қ., Ж.Р.; жазу - шолу және өңдеу - А.Қ., Ж.Р.; визуализация - А.Қ.; жетекшілік - Ж.Р. Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасымен танысып, келісті.

6. Авторлар туралы ақпарат

Қабдулмәжитұлы, Асанәлі – PhD-студент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; akabdulmazhituly@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6725-7845>

Рахымжан, Жанар - «Қоршаған ортаны қорғау саласындағы басқару және инжиниринг» кафедрасының доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; r.zhanar80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0794-906X>

Тазитдинова, Румия - «Қоршаған ортаны қорғау саласындағы басқару және инжиниринг» кафедрасының меңгерушісі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; tazitdinova_rm@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0388-1678>

7. Қаржыландыру: Бұл зерттеу сыртқы қаржыландыруды алған жоқ.

8. Алғыстар: Алғыс айтылмады.

9. Мүдделер қақтығыстары: Мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейміз.

10. Әдебиеттер тізімі

1. Ahmadi, F., Mohammadkhani, N., & Servati, M. (2022). Halophytes play important role in phytoremediation of salt affected soils in the bed of Urmia Lake, Iran. *Scientific Reports*, 12, 13741. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17769-9>
2. Ahmadi, M., Khoshgoftarmanesh, A. H., & Afyuni, M. (2022). Phytoremediation potential of halophytes in saline soils under arid conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), 26741–26755. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17738-5>
3. Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals - Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
4. Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
5. Amin, M., Li, Z., & Chen, X. (2020). Heavy metals in industrial soils of China: Spatial distribution and ecological risks. *Chemosphere*, 248, 126135. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126135>
6. Ashraf, M., Akram, N. A., & Foolad, M. R. (2020). Salinity tolerance mechanisms of plants: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 11. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00612-9>
7. Beisenova, R., Rakhymzhan, Z., & Tazitdinova, R. (2020). Comparative characteristics of germination of some halophyte plants in saline soils of Pavlodar Region. *Journal of Environmental Management and Tourism*, 11(6), 1379–1387. [https://doi.org/10.14505/jemt.v11.6\(46\).10](https://doi.org/10.14505/jemt.v11.6(46).10)
8. Clemens, S. (2019). Metal transport and detoxification in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 303–329. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100005>

9. FAO. (2021). Global map of salt-affected soils. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org>
10. FAO & Global Soil Partnership. (2015). Status of the World's Soil Resources. FAO. <https://www.fao.org>
11. Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2021). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 229(3), 1230–1246. <https://doi.org/10.1111/nph.17052>
12. Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
13. Glenn, E. P., Brown, J. J., & Blumwald, E. (1999). Salt tolerance and crop potential of halophytes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 18(2), 227–255. [https://doi.org/10.1016/S0735-2689\(99\)00388-3](https://doi.org/10.1016/S0735-2689(99)00388-3)
14. Gupta, B., & Huang, B. (2020). Mechanisms of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical and molecular characterization. *Agronomy*, 10(6), 859. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060859>
15. Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress. *Antioxidants*, 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
16. Hossain, M. A., Kumar, U., Burritt, D. J., Fujita, M., & Mäkelä, P. (2021). Halophytes as a resource for saline agriculture and phytoremediation. *Environmental and Experimental Botany*, 186, 104407. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104407>
17. Kazhydromet. (2023). Interactive map of soil quality in the Republic of Kazakhstan. National Hydrometeorological Service of Kazakhstan. <https://kazhydromet.kz>
18. Khalilzadeh, R., Ghorbani, H., & Asadzadeh, F. (2021). The potential of *Salicornia europaea* for phytoremediation of heavy metals under wastewater irrigation. *Chemosphere*, 281, 130974. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130974>
19. Khan, M. A., & Weber, D. J. (2008). *Ecophysiology of halophytes and their utilization in agriculture*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4018-0>
20. Lal, R. (2020). Soil carbon sequestration and climate change mitigation. *Soil and Tillage Research*, 198, 104527. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104527>
21. Levina, T., & Serikbayeva, A. (2020). Phytoremediation potential of halophyte species in salt affected soils of East Kazakhstan. *KazNU Bulletin. Ecology Series*, 2(68), 45–52. <https://journal.kaznu.kz/index.php/ecology>
22. Li, J., Wang, H., & Zhou, M. (2021). Heavy metal contamination around metallurgical plants: Soil pollution assessment. *Environmental Research*, 195, 110123. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110123>
23. Li, X., Wang, Y., Zhou, Y., & Zhang, H. (2021). Bioavailability and mobility of heavy metals in saline soils. *Science of the Total Environment*, 755, 142582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142582>
24. Manousaki, E., & Kalogerakis, N. (2011). Halophytes - An emerging trend in phytoremediation. *Chemosphere*, 83(5), 606–612. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.12.067>
25. Qadir, M., Quill rou, E., Nangia, V., Murtaza, G., & Noble, A. D. (2014). Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum*, 38(4), 282–295. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12054>
26. Rajkumar, M., Prasad, M. N. V., & Freitas, H. (2020). Phytoremediation: Potential challenges and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100596. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100596>
27. Ramazanova, D., Auezova, L., & Zhumanova, K. (2021). Ecological assessment of soil pollution near industrial centers of Ust-Kamenogorsk. *Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 2(391), 210–218. <https://journals.nauka-nanrk.kz/>
28. Rengasamy, P. (2010). Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, 37(7), 613–620. <https://doi.org/10.1071/FP09253>
29. Rengasamy, P. (2016). Soil salinity: Causes and management. *Agricultural Water Management*, 173,

- 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.001>
30. Rozema, J., & Flowers, T. (2008). Ecology of halophytes and saline environments. *Functional Plant Biology*, 35(7), 563–575. <https://doi.org/10.1071/FP08037>
31. Tangahu, B. V., Abdullah, S. R. S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). A review on heavy metals removal using phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011, 939161. <https://doi.org/10.1155/2011/939161>
32. Ventura, Y., & Sagi, M. (2013). Halophyte domestication for future agriculture. *Trends in Plant Science*, 18(10), 546–554. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.05.004>
33. Wang, Q., Cui, Y., & Dong, Y. (2021). Salinity effects on soil microbial communities and remediation strategies. *Applied Soil Ecology*, 165, 103987. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103987>
34. Wicke, B., Sikkema, R., Dornburg, V., & Faaij, A. (2011). Exploring land use changes and the role of palm oil production in Indonesia and Malaysia. *Land Use Policy*, 28(1), 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.06.001>
35. Woszczyk, M., Szychalski, W., & Boluspaeva, L. (2018). Trace metal fractionation in urban industrial soils of Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(6), 362. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6695-9>
36. Yuan, F., Leng, B., & Wang, B. (2020). Progress in physiological mechanisms of salt excretion in halophytes. *Frontiers in Plant Science*, 11, 593444. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.593444>
37. Zhou, Y., Wang, F., Li, X., Liu, Y., & Zhang, H. (2022). Phytoremediation efficiency of *Salicornia europaea* in highly saline soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 51421–51434. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19645-3>
38. Zhang, C., Liu, G., Xue, S., Song, Z., & Wang, P. (2018). Heavy metal bioavailability and risk assessment in arid and semi-arid soils. *Journal of Soils and Sediments*, 18(9), 3081–3092. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1996-7>
39. Zhang, H., Kim, M. S., Sun, Y., Dowd, S. E., Shi, H., & Paré, P. W. (2008). *Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105(44), 16571–16576. <https://doi.org/10.1073/pnas.0808046105>
40. Zhang, L., Wang, J., Bai, Z., & Lv, C. (2019). Halophytes and ecosystem restoration in degraded saline lands. *Ecological Engineering*, 138, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.013>
41. Zhang, M., Wang, S., Wu, F., Yuan, X., & Zhang, Y. (2022). Nature-based solutions for soil degradation and salinization control. *Science of the Total Environment*, 806, 150674. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150674>
42. Zhang, X., Liu, J., Huang, H., Chen, Y., & Wang, D. (2021). Mobility and bioavailability of heavy metals in saline soils under different land uses. *Science of the Total Environment*, 755, 142582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142582>
43. Zhang, Y., Li, F., Yang, M., & Wang, J. (2020). Salinity–heavy metal interactions in contaminated soils and implications for phytoremediation. *Chemosphere*, 243, 125382. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125382>
44. Zhao, F. J., & McGrath, S. P. (2009). Biofortification and phytoremediation. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.005>
45. Zhao, L., Li, X., Wang, Z., & Zhang, Y. (2020). Strategies for remediation of saline and sodic soils under climate change. *Land Degradation & Development*, 31(2), 190–203. <https://doi.org/10.1002/ldr.3433>
46. Zhao, S., Liu, J., Banerjee, S., Zhou, N., Zhao, Z., Zhang, K., & Tian, C. (2022). Climate change intensifies soil salinization worldwide. *Global Change Biology*, 28(4), 1192–1205. <https://doi.org/10.1111/gcb.15929>
47. Zhu, H., Chen, C., & Wang, J. (2020). Phytostabilization of heavy metals in saline soils using halophytes. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119809. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119809>
48. Zhu, J. K. (2016). Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, 167(2), 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>

49. Zhu, Q., Li, Y., Chen, J., & Wang, H. (2021). Long-term assessment of phytoremediation efficiency in heavy metal contaminated soils. *Environmental Pollution*, 268, 115828. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115828>
50. Zhu, X., Liu, W., Wang, Y., & Zhang, H. (2023). Phytoremediation performance under combined salinity and metal stress. *Environmental Research*, 216, 114560. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114560>
51. Zhu, Y. G., Gillings, M., Simonet, P., Stekel, D., Banwart, S., & Penuelas, J. (2017). Microbial mass movements and the spread of antibiotic resistance. *Nature Reviews Microbiology*, 15(6), 313–324. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.26>
52. Zörb, C., Geilfus, C. M., & Dietz, K. J. (2019). Salinity and crop yield. *Plant Biology*, 21(S1), 31–38. <https://doi.org/10.1111/plb.12884>
53. Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2013). Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 656–669. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>

The role of halophytic plants in phytotoxification of soils contaminated with heavy metals and salts: global experience and opportunities for Kazakhstan

Asanali Kabdulmazhituly, Zhanar Rakhymzhan, Rumiya Tazitdinova

Abstract. Soil salinization and pollution with heavy metals are among the main environmental factors that lead to the degradation of land resources at the present stage. These phenomena are especially widespread in arid and semi-arid regions, causing a decrease in agricultural productivity, a violation of the physico-chemical properties of soils and a weakening of the stability of ecosystems. In arid climates, salinization and man-made pollution are often observed simultaneously, significantly limiting the processes of natural soil self-restoration. In this regard, the search for environmentally safe and long-term recovery approaches is becoming increasingly urgent. This review-study examined in detail the role of halophytic plants in phytoremediation of soils contaminated with salinized and heavy metals (Pb, Cd, Zn, Cu). Especially the ability of *Salicornia europaea*, *Suaeda*, *Atriplex* and other halophyte species to accumulate salt ions and heavy metals was analyzed at the physiological and molecular level. The results of world studies were compared with the data on the territory of Kazakhstan, and environmental and geochemical factors affecting the effectiveness of phytoremediation were identified. The results of the study showed that halophytic plants can reduce the bioavailability and mobile forms of heavy metals, in addition to reducing the level of salinity in complex polluted soils. In the conditions of Kazakhstan, the use of halophytes is a promising direction in terms of restoring degraded lands, increasing ecosystem stability and managing environmental risks. The conclusions obtained allow the practical application of phytoremediation as a natural-oriented and scientifically based solution. The development of this direction is important for the rational use of land resources, ensuring environmental safety and the formation of sustainable agroecosystems.

Keywords: soil salinization; heavy metals; halophytic plants; phytoremediation; *Salicornia europaea*.

Роль галофитных растений в фитотазировании почв, загрязненных тяжелыми металлами и солями: мировой опыт и возможности для Казахстана

Асанали Кабдулмажитулы, Жанар Рахымжан, Румия Тазитдинова

Аннотация. Засоление и загрязнение почвы тяжелыми металлами относятся к числу основных факторов окружающей среды, приводящих к деградации земельных ресурсов на современном этапе. Эти явления особенно распространены в засушливых и полузасушливых регионах, вызывая снижение продуктивности сельского хозяйства, нарушение физико-химических

свойств почв и ослабление устойчивости экосистем. В аридном климате засоление и техногенное загрязнение часто наблюдаются одновременно, что значительно ограничивает процессы естественного самовосстановления почвы. В этой связи актуальным становится поиск экологически безопасных и долгосрочных подходов к восстановлению. В этом обзорном исследовании всесторонне рассматривалась роль галофитных растений в фитодезагрегации засоленных и загрязненных тяжелыми металлами почв (Pb, Cd, Zn, Cu). В частности, способность *Salicornia europaea*, *Suaeda*, *Atriplex* и других видов галофитов накапливать ионы солей и тяжелые металлы была проанализирована как на физиологическом, так и на молекулярном уровне. Результаты мировых исследований сопоставлены с данными на территории Казахстана, определены экологические и геохимические факторы, влияющие на эффективность фиторемедиации. Результаты исследования показали, что галофитные растения могут снижать биодоступные и подвижные формы тяжелых металлов, а также снижать уровень засоления в комплексно загрязненных почвах. В условиях Казахстана применение галофитов является перспективным направлением с точки зрения восстановления деградированных земель, повышения экосистемной устойчивости и управления экологическими рисками. Полученные результаты позволяют применять фиторемедиацию на практике как естественно-ориентированное и научно обоснованное решение. Развитие этого направления важно для рационального использования земельных ресурсов, обеспечения экологической безопасности и формирования устойчивых агроэкосистем.

Ключевые слова: засоление почвы; тяжелые металлы; галофитные растения; фиторемедиация; *Salicornia europaea*.