

OG'IR METALLARNING O'SIMLIK HUJAYRALARIDAGI BIOKIMYOVIY O'ZGARISHLARGA TA'SIRI

ВЛИЯНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА БИОХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В РАСТИТЕЛЬНЫХ КЛЕТКАХ

THE EFFECT OF HEAVY METALS ON BIOCHEMICAL CHANGES IN PLANT CELLS

¹Ahrorova Shahrizoda Abbosjon qizi

¹Shahrasabz davlat pedagogika instituti, biologiya yo'nalishi talabasi.

E-mail: shahrizodaahrorova35@gmail.com +998771051905

ORCID: 0009-0007-6261-9588

²Shavkatova Dilnoza Shavkatovna

²Shahrasabz davlat pedagogika instituti, texnika fanlari v.b.dotsenti.

E-mail: shavkatova89dilnoza@mail.ru +998919491030

ORCID: 0009-0002-3013-7457

Аннотация

Ushbu maqolada antropogen omillar ta'sirida atrof-muhitga tarqalayotgan og'ir metallarning o'simlik hujayralaridagi biokimyoviy jarayonlarga ko'rsatadigan salbiy ta'siri atroflicha tahlil qilingan. Tadqiqotda metallarning hujayraga kirib borish yo'llari, oksidlovchi stress (ROS) hosil bo'lishi, fermentativ faollikning inaktivatsiyasi va fotosintez apparatining buzilish mexanizmlari yoritilgan. Shuningdek, o'simliklarning ushbu toksikantlarga qarshi adaptiv javob reaksiyalari, jumladan, fitoxelatinlar sintezi va vakuolyar sekvestratsiya jarayonlari bayon etilgan. Maqola ekologiya, o'simliklar fiziologiyasi va biokimyosi sohasidagi mutaxassislar hamda talabalar uchun ilmiy manba bo'lib xizmat qiladi.

Аннотация

В данной статье представлен всесторонний анализ негативного воздействия тяжелых металлов, попадающих в окружающую среду под влиянием антропогенных факторов, на биохимические процессы в растительных клетках. Исследование охватывает пути проникновения металлов в клетку, образование окислительного стресса (АФК), инактивацию ферментативной активности и

механизмы нарушения фотосинтетического аппарата. Также описаны адаптивные реакции растений на эти токсиканты, включая синтез фитохелатинов и процессы вакуолярной секвестрации. Статья служит научным ресурсом для специалистов и студентов в области экологии, физиологии растений и биохимии.

Abstract.

In this article, it was found expedient to obtain sulfur concrete based on organic nitrogen-containing compounds. Melamine, hydrazine, 2,4-dinitrophenylhydrazine, and bitumen were used as modifiers. The corrosion resistance of the obtained samples of sulfur concrete was studied in aggressive environments, including: 10% solutions of acids H_2SO_4 , HCl , HNO_3 . This article provides a comprehensive analysis of the negative impact of heavy metals released into the environment under the influence of anthropogenic factors on biochemical processes in plant cells. The study covers the pathways of metals entering the cell, the formation of oxidative stress (ROS), the inactivation of enzymatic activity, and the mechanisms of disruption of the photosynthetic apparatus. It also describes the adaptive responses of plants to these toxicants, including the synthesis of phytochelatin and vacuolar sequestration processes. The article serves as a scientific resource for specialists and students in the fields of ecology, plant physiology, and biochemistry.

Kalit so'zlar: Og'ir metallar, oksidlovchi stress, xlorofill, patogen, gomeostaz, antioksidant, fotosintez.

Ключевые слова: Тяжелые металлы, окислительный стресс, хлорофилл, патоген, гомеостаз, антиоксидант, фотосинтез.

Key words: Heavy metals, oxidative stress, chlorophyll, pathogen, homeostasis, antioxidant, photosynthesis.

KIRISH

Bugungi kunda sanoatning jadal rivojlanishi va qishloq xo'jaligida kimyoviy o'g'itlardan nazoratsiz foydalanish tuproq va suvning og'ir metallar bilan ifloslanishiga olib keldi. Pb, Cd va Hg kabi metallar tuproqda parchalanmaydi va biokumulyatsiya (to'planish) xususiyatiga ega. Bu nafaqat o'simliklar dunyosini, balki ozuqa zanjiri orqali inson salomatligini ham xavf ostiga qo'yayotgani mavzuning global miqyosda dolzarbligini belgilaydi.

Atrof-muhitning ifloslanishi barqaror qishloq xo'jaligi uchun asosiy to'siqdir. Tuproq va suv og'ir metallar, pestitsidlar va ortiqcha o'g'itlar bilan ifloslanishi mumkin, bu tuproq salomatligiga zarar etkazadi, zararkunandalarga qarshi kurash va changlatish uchun zarur bo'lgan biologik xilma-xillikni kamaytiradi va oziq-ovqat xavfsizligi uchun xavf tug'diradi. Ifloslanish, shuningdek, iqlim o'zgarishini kuchaytiradi, ekstremal ob-

havo hodisalari hosildorlik va suv resurslariga putur yetkazadi. Bu degradatsiyaning katta qismi tog'-kon sanoati, quyish zavodlari, eritish zavodlari va boshqa metallurgiya sanoati bilan bog'liq nuqtali manba ifloslanishidan kelib chiqadi[1]. Suvdan yuqori zichlik bilan tavsiflangan og'ir metallar [2] barqaror qishloq xo'jaligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Ular atrof-muhitga korroziya, atmosfera cho'kishi, eroziya, yer osti suvlarini yuvish, cho'kindilarning qayta suspenziyasi va suvning bug'lanishi orqali kiradi[3]. Plastmassa, to'qimachilik, mikroelektronika, yog'ochni saqlash va qog'oz sanoatidagi ishlab chiqarish, shuningdek, atom elektr stantsiyalari, elektr liniyalari, ko'mir va neftni yoqish va metallni qayta ishlash sohalaridagi operatsiyalar og'ir metallarning asosiy sanoat manbalari hisoblanadi[4,5].

O'simlik hujayrasidagi biokimyoviy o'zgarishlarni o'rganish bizga quyidagilarni tushunishga imkon beradi:

Stressga chidamlilik: O'simliklarning ekstremal sharoitda omon qolish chegaralarini aniqlash.

Oziq-ovqat xavfsizligi: Qaysi ekinlar metallarni kamroq to'plashi va iste'mol uchun xavfsiz ekanligini ilmiy asoslash.

Ekologik indikatsiya: O'simlikdagi biokimyoviy o'zgarishlarga qarab atrof-muhit ifloslanish darajasini baholash.

Og'ir metallarning salbiy ta'sirini kamaytirish uchun zamonaviy ilm-fanda quyidagi yechimlar taklif etilmoqda:

Fitoremediatsiya: Tuproqni metallardan tozalash uchun "giperakkumulyator" (metallarni yutuvchi) o'simliklarni ekish.

Genez muhandisligi: Metallarni vakuolalarda xavfsiz saqlashga mas'ul bo'lgan genlarni faollashtirish.

Ekzogen himoya: O'simliklarga tashqi tomondan antioksidantlar va mikroelementlar (masalan, Selen yoki Kremniy) berish orqali ularning himoya tizimini kuchaytirish.

Ushbu sohadagi izlanishlar quyidagi natijalarni beradi:

Iqtisodiy samaradorlik: Tozalangan yerlardan qayta foydalanish imkoniyati ortadi.

Ekologik barqarorlik: Tabiiy ekotizimlarning genofondi saqlab qolinadi.

Sog'liqni saqlash: Qishloq xo'jaligi mahsulotlari tarkibidagi toksik moddalar miqdori nazorat qilinadi.

ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

Og'ir metallar - bu metallarning (shu jumladan yarim metallarning) xossalari va muhim atom og'irligi yoki zichligi bo'lgan kimyoviy elementlar. Og'ir metallar yer yuzida tabiiy ravishda uchraydigan elementlardir. Asosiy og'ir metallarga simob, mishyak, selen, kaltsiy, magniy, kumush, bariy, kadmiy, xrom, kobalt, mis, temir, qo'rg'oshin,

nikel, qalay, rux va alyuminiy kiradi. Ulardan eng xavfli bo'lganlari qo'rg'oshin, kadmiy, simob, mishyak, xrom va alyuminiydir. [6,7] Og'ir metallar atamasining qirqga yaqin ta'rifi mavjud bo'lib, ulardan birini eng ko'p qabul qilingani sifatida ko'rsatish mumkin emas. Shunga ko'ra, turli xil ta'riflarga ko'ra og'ir metallar ro'yxati turli elementlarni o'z ichiga oladi. Amaldagi mezon 50 dan ortiq nisbiy atom massasi bo'lishi mumkin, bu holda vanadiy bilan boshlangan barcha metallar zichligidan qat'iy nazar, ro'yxatga kiritilgan. Yana bir tez-tez ishlatiladigan mezon temir zichligiga (8 g/sm^3) taxminan teng yoki undan kattaroq zichlikdir, keyin qo'rg'oshin, simob, mis, kadmiy, kobalt kabi elementlar ro'yxatga kiritiladi va, masalan, engil qalay. ro'yxatidan chiqib ketadi. Boshqa chegara zichliklari (masalan, zichlik 5 g/sm^3 [8][9]) yoki atom og'irligi bo'yicha tasniflar mavjud. Ba'zi tasniflar nodir va nodir metallarni og'ir deb tasniflamasdan istisno qiladi; ba'zilari rangli metallarni (temir, marganets) istisno qiladi. Ko'pincha "og'ir metallar" atamasi kimyoviy emas, balki tibbiy va ekologik nuqtai nazardan ko'rib chiqiladi[10].

Og'ir metallar (Cd, Pb, Hg, Zn, Cu) o'simlik hujayrasiga asosan ildiz orqali, membrana oqsillari (tashuvchilar) yordamida faol va nofaol transport (apoplastik va simplastik yo'llar) orqali kiradi. Ular oziq moddalar (masalan, Fe, Zn, Ca) kanallaridan foydalanib hujayra ichiga o'tadi, bu esa membrana o'tkazuvchanligini buzishi va fermentlarni tormozlashi mumkin.

Og'ir metallarning hujayraga kirish va harakatlanish mexanizmlari:

Apoplastik transport: Metall ionlari hujayra devorlari va hujayralararo bo'shliqlar orqali ildizning markaziy silindriga qadar harakatlanadi. Bu passiv jarayon hisoblanadi.

Simplastik transport: Metall ionlari plazmalemma (hujayra membranasi) orqali sitoplazmaga kiradi va plazmodesmalar orqali hujayradan-hujayraga o'tadi.

Membrana tashuvchilari: Og'ir metallar o'simlik uchun zarur bo'lgan oziq moddalar ionlari (Zn^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+}) uchun mo'ljallangan transport oqsillari orqali adashib, hujayra ichiga kirib oladi.

NATIJA VA MUHOKAMA

Cd, Pb, As, Hg, Cr va Ni kabi og'ir metallar fiziologik, biokimyoviy va molekulyar jarayonlarni buzish orqali o'simliklar salomatligiga jiddiy tahdid soladi (1- jadval). Bu metallar biologik parchalanmaydi va atrof-muhitda saqlanib qoladi, bu esa yuqori konsentratsiyalarda mavjud bo'lganda o'simliklar uchun surunkali toksiklikka olib keladi.

Jadval 1. Og'ir metallarning o'simliklarga xos toksik ta'sirlari.

Metall	Asosiy ta'siri	Tashqi belgilari (Semptomlar)
--------	----------------	-------------------------------

Qo'rg'oshin(Pb)	Fermentlar faoliyatini va fotosintezni tormozlaydi	Ildiz o'sishining to'xtashi, barglarning sarg'ayishi (xloroz)
Kadmiy(Cd)	Suv va minerallar so'rilishini buzadi, DNKni shikastlaydi	O'simlikning bo'yi pastligi, barg chetlarining qurishi (nekroz)
Simob(Hg)	Hujayra membranalarini va metabolizmni buzadi	Fotosintezning keskin pasayishi, o'simlikning tez so'lishi

Atrof-muhitda og'ir metallarning ikki xil manbai mavjud: antropogen va tabiiy (geogen yoki litogen). Atrof-muhitga metallarni chiqaradigan tabiiy faoliyatlar vulqon otilishlari va tarkibida metallar bo'lgan tog' jinslarining nurashini o'z ichiga oladi[11]. Urbanizatsiya va sanoatlashtirishdagi global o'zgarishlar inson faoliyatining atrof-muhitning og'ir metallar bilan ifloslanishiga ta'sirini sezilarli darajada oshirdi[12]. Konchilik, sanoat operatsiyalari va qishloq xo'jaligi amaliyotlari aniqlangan asosiy antropogen sabablar qatoriga kiradi. Elementlar o'z rudalaridan yoki qazib olish jarayonida ajratib olinganda, og'ir metallar ajralib chiqadi[13]. Nam va quruq atmosferada cho'ktirish jarayonlari materiallarning quruqlikka chiqishini osonlashtiradi[14]. Og'ir metallar atrof-muhitga, jumladan, maishiy va sanoat chiqindilari orqali chiqariladi. Maishiy va sanoat chiqindilarini o'z ichiga olgan chiqindi suvlar atrof-muhitda og'ir metallar darajasining oshishiga olib keladi. Kimyoviy o'g'itlardan foydalanish va qazilma yoqilg'ilarni yoqish insonning atrof-muhitga og'ir metallarni kiritishiga ikkita misoldir. Og'ir metallarning ma'lum bir miqdori bilan ajralib turadigan o'g'it turi fosforli o'g'itdir. O'g'itlar, gerbitsidlar va insektitsidlar kabi ikkilamchi manbalar vaqt o'tishi bilan qishloq xo'jaligi tuproqlarida og'ir metallar konsentratsiyasini oshiradi[15]. Vulqon faolligi, metall korroziyasi, tuproq va suvning bug'lanishi, cho'kindilarning qayta suspenziyasi, tuproq eroziyasi va geologik nurash og'ir metallarning ifloslanishiga hissa qo'shadigan o'zgaruvchilar qatoriga kiradi.

Og'ir metallar hujayra darajasida quyidagi salbiy jarayonlarni keltirib chiqarish jadvali quyidagi 2-jadvalda keltirilgan.

Jadval 2. Biokimyoviy va fiziologik o'zgarishlar umumiy ko'rinishi.

Jarayon	Ta'sir mexanizmi	Natija
Fotosintez	Xlorofill pigmentlarining parchalanishi	Organik modda sintezining kamayishi
Oksidlanish stresi	Erkin radikal (ROS- Reactive Oxygen Species) larning ortishi	Hujayra membranalari va oqsillar shikastlanishi
Mineral oziqlanish	Foydali ionlar (Ca, Mg, K, Fe) bilan raqobat	Oziqlanish yetishmovchiligi
Suv almashinuvi	Ildiz o'tkazuvchanligining pasayishi	Suv tanqisligi va transpiratsiyaning buzilishi

Og'ir metallarning toksikligi stressga uchragan o'simliklarning umumiy o'sish ko'rsatkichlariga salbiy ta'sir qiladi, bu og'ir metallar bilan ifloslangan tuproqlarda o'stirilgan o'simliklarning o'sishi va hosildorligining tasdiqlangan pasayishi bilan tasdiqlanadi[16],[17]. Ildiz o'sishi jarayoni hujayra bo'linishi va hujayralarning cho'zilishi kabi murakkab mexanizmlarni o'z ichiga oladi. Og'ir metallarning mavjudligi mitotik faollikka salbiy ta'sir ko'rsatadi, natijada turli o'simlik turlarida ildiz o'sishi sekinlashadi[18]. Xu va boshqalar tomonidan olib borilgan tadqiqotda [19] ortiqcha Cu²⁺ + qo'llanilishi NO ga antagonistik bo'lgan auksin darajasidagi o'zgarishlar orqali ildiz uzunligi va ildiz morfologiyasiga ta'sir qilishi ko'rsatildi. Bundan tashqari, og'ir metallar tomonidan ildiz o'sishining inhibitsiyonu tez-tez ildiz diametrini oshirdi[20], garchi bunga o'simlik sitoskeletlari ham ta'sir qilishi mumkin. Natijalar shuni ko'rsatadiki, og'ir metallar ildiz o'sishini inhibe qilishi va suv balansini va ozuqa moddalarining so'rilishini buzishi mumkin, shu bilan resurslarni o'simlikning havo qismlariga tashishni murakkablashtiradi.

O'simliklar o'zini himoya qilish uchun jismoniy to'siqlar, metabolik jarayonlar va antioksidant tizimlardan foydalanadilar. Ushbu himoya mexanizmlarini keng miqyosda uchta asosiy turga ajratish mumkin: strukturaviy (jismoniy) to'siqlar, ikkilamchi metabolitlarni o'z ichiga olgan metabolik jarayonlar va oksidlovchi stressga qarshi kurashadigan murakkab antioksidant tizimlar. O'simliklar patogenlarning kirib kelishi va atrof-muhitning stress omillariga qarshi birinchi himoya chizig'i sifatida strukturaviy to'siqlarni o'rnatadi. Bu to'siqlar quyidagilarni o'z ichiga oladi: Kutikula va mumlar Epidermisning eng tashqi qatlami kutin va mumlardan iborat bo'lib, ular patogenlarning kirishini cheklaydigan va suv yo'qotilishini minimallashtiradigan hidrofobik to'siqni hosil

qiladi. Hujayra devorlari Tsellyuloza, gemitsellyuloza, pektin va lignindan tashkil topgan hujayra devorlari qattiq himoya tuzilishi bo'lib xizmat qiladi [21].

Jadval 3. Og'ir metallarning o'simliklarga ta'siri

Og'ir metallar	Konsentratsiyalar	O'simliklar	Effektlar
Nikel va rux	100 mg/kg Ni 100 mg/kg Zn	Bug'doy	O'simliklar o'sishining pasayishi Ifloslangan tuproqda antioksidant fermentlar, superoksid dismutazalar (SOD) va peroksidaza (POD) kamaydi
Kadmiy, xrom va qo'rg'oshin	300 mg/kg	Brassica chinensis va Brassica rapa L	Niholning kechikishi Nihol foizining pasayishi
Piren, Rux, qo'rg'oshin, kadmiy	Piren (500 mg/kg), Zn (150 mg/kg), Pb (150 mg/kg) va Cd (150 mg/kg) alohida va kombinatsiyalangan holda	Medicago sativa	Piren va og'ir metallar bilan ifloslangan tuproqlarda o'sish parametrlari, biomassa va xlorofil miqdori kamaydi, prolin, polifenol miqdori va metallotionin oqsil miqdori oshdi.
Mishyak va kadmiy	100 µL	Bug'doy	Nisbiy o'sish sur'ati va

			fotosintetik parametrlar pasaydi H ₂ O ₂ miqdori va lipid peroksidlanishi oshdi
Kadmiy	20 mg Cd/kg tuproq	Raphanus sativus	Ildiz uzunligi, novda uzunligi, o'simlikning yangi vazni, o'simlikning quruq vazni va xlorofill miqdorining kamayishi
Xrom, rux va nikel	2 mM	Hordeum vulgare	O'sish parametrlarining pasayishi
Mis	Mis bilan ifloslangan tuproq	Corchorus capsularis	Urug'ning unib chiqishini, o'simlik balandligini, yangi biomassani, fotosintetik pigmentni va gaz almashinuvi parametrlarini pasaytirdi va MDA miqdorini, prolin konsentratsiyasini va turli antioksidant birikmalarning faolligini oshirdi.

Qo'rg'oshin	100, 200, 400 va 800 mg/kg	Sorghum	Nihol indeksi (GRI), ildiz va tuk uzunligi (sm), kuch indeksi (VI) va bardoshlik indeksi (TI) pasaydi
Kadmiy	5 mg/L KD	Sutcho'p	O'sish xususiyatlarining pasayishi, xlorofill, karotinoid miqdori, ROSning ko'payishi va fermentativ bo'lmagan va fermentativ antioksidantlar

Hujayra devori pektinlar, tsellyuloza va lignin tarkibidagi karboksil, gidroksil va fosfat guruhlari bilan o'zaro ta'sir orqali og'ir metall ionlarini adsorblash va immobilizatsiya qilish orqali passiv to'siq bo'lib xizmat qiladi. Cd kabi metallarga duchor bo'lganda, hujayra devorlari qalinlashishi mumkin, bu esa lignin va suberinning ko'payishiga olib keladi. Bu jarayon bu metallarning harakatchanligini pasaytiradi [24]. Masalan, kadmiy hujayra devori matritsada qolib ketishi mumkin, bu uning sezgir hujayra komponentlariga o'tishini cheklashga yordam beradi. Trixomalar va tikanlar Bu tashqi xususiyatlar o'txo'r hayvonlarni qo'rqitadi va mexanik himoyani ta'minlaydi. Trixomalar og'ir metallarni to'playdi yoki metall toksikligini yumshatuvchi ikkilamchi metabolitlarni ishlab chiqaradi. O'simliklar stressni yoki patogenlarning kirib kelishini sezganda, ular turli xil himoya birikmalarini ishlab chiqaradigan metabolik yo'llarni faollashtiradilar: Fitoaleksinlar Bu past molekulyar og'irlikdagi oqsillar, metalloxaperonlar va niktianamin, putresin, spermin, glutation, fitokhelatinlar, metallotioninlar, organik kislotalar, mugin kislotalari va flavonoidlar va fenol birikmalarini o'z ichiga olgan ikkilamchi metabolitlar kabi xelatlarini ishlab chiqarishni o'z ichiga oladi. O'simliklar stressni yumshatish uchun salitsil kislotasi, jasmon kislotasi va etilenni chiqaradi. Patogenez bilan bog'liq (PR) oqsillar β -1,3-glyukanazlar va xitinazalar kabi PR oqsillari qo'ziqorin hujayra devorlarini parchalashga yordam beradi [23]. Ikkilamchi metabolitlar Alkaloidlar, flavonoidlar va terpenoidlar kabi birikmalar

o'txo'rlar va patogenlarni oldini olishda muhim rol o'ynaydi. ROS muhim signalizatsiya molekulalari, ammo agar ular ehtiyotkorlik bilan tartibga solinmasa, oksidlovchi zararga olib kelishi mumkin. O'simliklar ROS darajasini boshqarish uchun ham fermentativ, ham fermentativ bo'lmagan antioksidantlardan foydalanadilar:

Fermentativ antioksidantlar. Bularga superoksid radikallari va vodorod peroksid kabi zararli ROSlarni yo'q qilishga yordam beradigan SOD, CAT va APX kiradi.

Ferment bo'lmagan antioksidantlar Askorbin kislotasi, glutation, tokoferollar va fenolik kislotalar kabi birikmalar ROS to'planishini buferlaydi va oksidlanish-qaytarilish gomeostazini saqlashga yordam beradi. Ushbu antioksidant tizimlar salitsil kislotasi (SA), jasmonik kislota (JA) va ABA ishtirok etadigan signalizatsiya yo'llari bilan chambarchas bog'liq bo'lib, o'simliklarga duch keladigan stress turiga qarab himoya javoblarini nozik sozlash imkonini beradi [22].

Jorjani va boshqalar arpa suv tanqisligiga o'xshash metall toksikligining dastlabki belgilarini namoyon qilganini, suvsizlanish stressi bilan bog'liq genlar Cd va Hg ta'siriga javoban haddan tashqari ifodalanganligini kuzatdilar. Chen va boshqalar [25] beda ildizlarida oksidlovchi stress va glutationning kamayib ketishini og'ir metallarga ta'sir qilgandan keyin sezish va signal uzatishning dastlabki ko'rsatkichlari sifatida aniqladilar. Ushbu mexanizmlar orqali o'simliklar og'ir metallarni boshqarishi yoki zararsizlantirishi mumkin, bu ularni og'ir metallarning ifloslanishini kamaytirishga qaratilgan fitoremediatsiya strategiyalarida asosiy ishtirokchilarga aylantiradi. Ushbu himoya mexanizmlaridan foydalanish yoki ularni kuchaytirish orqali o'simliklar ifloslangan muhitga bardosh bera oladi yoki hatto gullab-yashnaydi, bu esa bioremediatsiya jarayonlariga hissa qo'shadi.

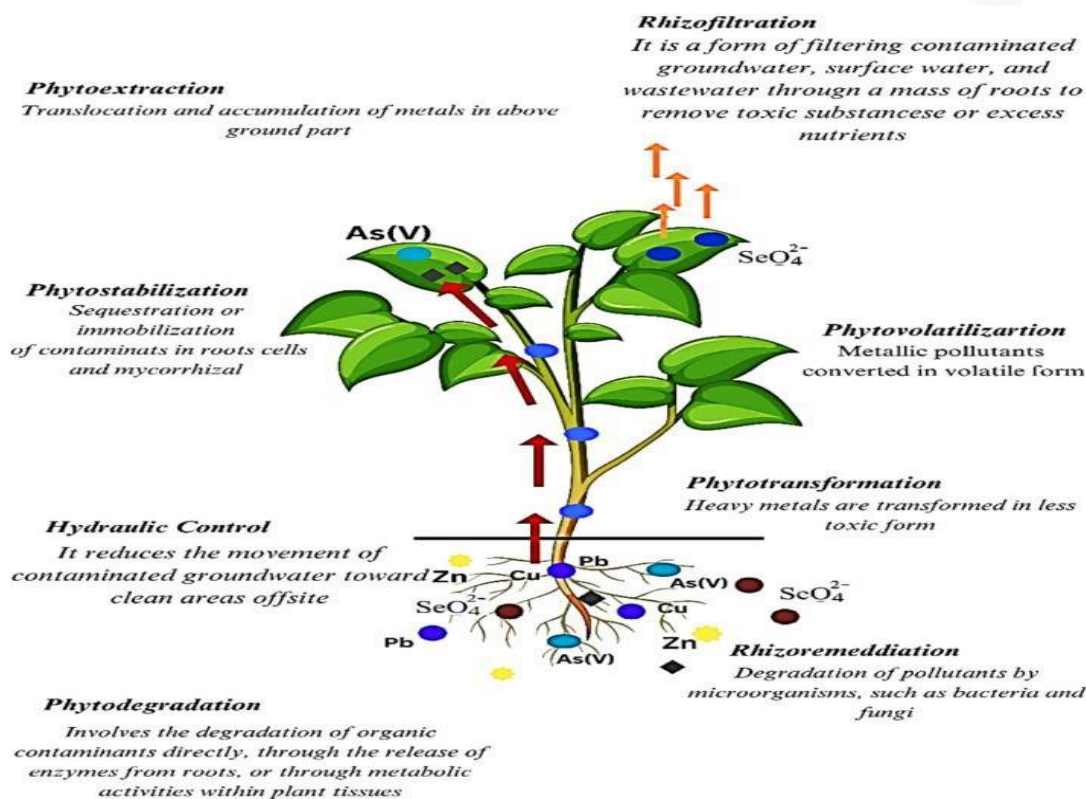
Fitoxelatin sintezi va vakuolyar sekvestratsiya o'simliklarning og'ir metallarga nisbatan shakllangan asosiy hujayraviy-detoksifikatsion moslashuv mexanizmlaridan hisoblanadi. Og'ir metall ionlari (xususan, kadmiy, qo'rg'oshin, simob va nikel) hujayraga kirgach, ular hujayra ichki muhitida oksidlovchi stressni kuchaytiradi va oqsil, lipid hamda nuklein kislotalarning tuzilmasiga zarar yetkazishi mumkin. Ushbu toksik ta'sirni cheklash maqsadida o'simlik hujayralarida glutation (GSH) ishtirokida fitoxelatinlar sintezlanadi. Fitoxelatinlar past molekulyar og'irlikka ega bo'lgan oltingugurtga boy peptidlar bo'lib, metall ionlari bilan barqaror komplekslar hosil qiladi. Natijada metallarning sitoplazmadagi erkin konsentratsiyasi keskin kamayadi, fermentativ tizimlarning inaktivatsiyasi va hujayra membranalarining shikastlanishi oldi olinadi.

Hosil bo'lgan metallfitoxelatin komplekslari hujayra ichida uzoq muddat qolib ketmaydi, balki tonoplast membranasida joylashgan maxsus tashuvchi oqsillar

(transportyorlar) yordamida vakuolaga ko'chiriladi. Vakuolyar sekvestratsiya jarayoni metall ionlarini metabolik faol hududlardan ajratib qo'yib, ularni nisbatan xavfsiz depol holatida saqlash imkonini beradi. Bu esa sitoplazmada metabolik jarayonlarning barqarorligini ta'minlab, fotosintez, nafas olish va modda almashinuvi kabi muhim fiziologik jarayonlarning davom etishiga sharoit yaratadi. Shuningdek, vakuolada metall ionlarining to'planishi o'simlik hujayralarining o'ta yuqori konsentratsiyadagi toksik muhitga moslashish qobiliyatini oshiradi.

Mazkur mexanizmlarning molekulyar va genetik asoslarini chuqur o'rganish amaliy jihatdan ham katta ahamiyatga ega. Xususan, fitoxelatin sintezida ishtirok etuvchi fermentlarning faolligini kuchaytirish yoki vakuolaga metall tashuvchi transportyor oqsillarning ekspressiyasini oshirish orqali og'ir metallarni ko'proq to'play oladigan, toksik sharoitga chidamli o'simlik navlarini yaratish imkoniyati mavjud. Bunday o'simliklardan fitoremediatsiya texnologiyalarida foydalanish sanoat chiqindilari bilan ifloslangan tuproq va suv havzalarini ekologik jihatdan toza va iqtisodiy samarali usulda tozalash imkonini beradi.

Fitoremediatsiya - bu tuproq va suvdagi ifloslantiruvchi moddalarni olib tashlash, parchalash yoki barqarorlashtirish uchun ishlatiladigan o'simliklarga asoslangan usul. Bu jarayon o'simliklarning ifloslantiruvchi moddalarni o'z to'qimalariga singdirishi, ularni ildizlariga cho'ktirishi, bog'liq mikroorganizmlar tomonidan parchalanishini osonlashtirishi yoki Fito immobilizatsiyasi va Fitostabilizatsiyasi kabi mexanizmlar orqali ularni zararsiz holatga keltirishini o'z ichiga oladi [23]. Qayta tiklash strategiyasi sifatida u operatsion jihatdan sodda, estetik jihatdan jozibali, tejamkor va keng qabul qilingan. Fitoremediatsiyaning ikkita muhim usuli - bu fitoekstraksiya va Fitostabilizatsiya. Fitoekstraksiya jarayonida o'simliklar tuproqdan og'ir metallarni o'zlashtiradi va ularni kurtaklari va barglarida to'playdi. Fitostabilizatsiya tuproqdagi og'ir metallarni ildizlarning singishi, ildiz yuzalariga adsorbsiyasi, ekssudat keltirib chiqaradigan kompleks hosil bo'lishi yoki yog'ingarchilik, rizosferaning kamayishi va tuproq barqarorligini oshirish kabi mexanizmlar orqali samarali ravishda immobilizatsiya qiladi. Fitostabilizatsiya uchun ishlatiladigan o'simliklar og'ir metallarga chidamlilikni namoyon etadi, sezilarli darajada ildiz biomassasiga ega va metallarning ildizlaridan yer usti qismlariga tashilishini samarali ravishda minimallashtiradi. Sibth, qizil fescue, simli o't, somon o'ti, Suriya loviya kaperisi va begemot o'ti Pb, Zn, Cr va Cu bilan ifloslangan tuproqlarni tozalashda samarali ekanligini ko'rsatadi.



1-rasm. O'simliklardagi og'ir metallarning fitoremediatsiyasi

Fitoboshqaruvning muvaffaqiyati tez o'sadigan, chuqur ildiz otgan, ko'payishi oson va yuqori biomassa ishlab chiqarishga qodir bo'lgan mos o'simlik turlarini tanlashga bog'liq. Bundan tashqari, bu o'simliklar fitoekstraksiya, fitodegradatsiya, rizofiltratsiya, fitostabilizatsiya, fitovolatilizatsiya, fitotransformatsiya, rizoremediatsiya va gidravlik nazorat kabi turli xil fitoremediatsiya jarayonlarini bajarishga qodir bo'lishi kerak (1-rasm). Bu jarayonlar o'simliklarga ifloslantiruvchi moddalarni olib tashlash, neytrallashtirish yoki barqarorlashtirish orqali tuproq ifloslanishini bartaraf etish imkonini beradi. Bundan tashqari, tanlangan o'simliklar ifloslangan tuproq bilan bog'liq xavflarni, masalan, sho'rlanishni kamaytirish yoki tuproq tuzilishini barqarorlashtirishni kamaytirishga yordam berishi kerak. Muhimi, bu o'simliklarni yetishtirish iqtisodiy jihatdan samarali va ma'lum bir joy va yerdan foydalanish sharoitlarida amalga oshirilishi kerak.

Mahalliy agroiklim va tuproq sharoitiga moslashgan o'simlik turlarini tanlash fitoremediatsiya jarayonining samaradorligini belgilovchi muhim omillardan biri hisoblanadi. Aksariyat ilmiy ishlarda fitoremediatsiya uchun chet el sharoitida o'rganilgan yoki laboratoriya tajribalarida yuqori natija ko'rsatgan o'simlik turlaridan foydalanish tavsiya etiladi. Biroq bunday turlar har doim ham mahalliy iqlim sharoitida

barqaror o'sib rivojlana olmaydi, turli abiotik stress omillari (haroratning keskin o'zgarishi, sho'rlanish, namlik tanqisligi) ta'sirida fitoremediatsiya samaradorligi pasayib ketishi mumkin. Shu bois, fitoremediatsiya texnologiyalarini amaliyotga joriy etishda hududiy sharoitga mos, ekologik jihatdan barqaror va tez biomassa hosil qiluvchi o'simlik turlarini tanlab olish ilmiy-amaliy jihatdan asoslangan yondashuv hisoblanadi.

Mazkur yondashuvda mahalliy flora tarkibida keng tarqalgan va agrotexnik jihatdan yaxshi o'zlashtirilgan o'simlik turlari orasidan og'ir metall ionlarini yutish qobiliyati nisbatan yuqori bo'lgan turlar aniqlanadi. Tanlangan o'simliklarda og'ir metallarning ildiz, poya va barglarda to'planish darajasi solishtirma tahlil qilinadi, shu bilan birga ularning o'sish surati, biomassa hosil qilishi hamda fiziologik barqarorligi baholanadi. Olingan natijalar asosida ma'lum hudud uchun fitoremediatsiya samaradorligi yuqori bo'lgan o'simlik turlarining tavsiya etiladigan ro'yxati shakllantiriladi. Bunday yondashuv ifloslangan tuproq va suv muhitlarini tozalashda mahalliy resurslardan samarali foydalanish imkonini yaratadi, fitoremediatsiya texnologiyalarining ekologik barqarorligi va iqtisodiy samaradorligini oshiradi.

XULOSA

Og'ir metallarning antropogen faoliyat natijasida atrof-muhitda keng tarqalishi zamonaviy ekologik muammolarning eng dolzarb yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Ushbu toksik elementlar o'simlik organizmiga kirib, hujayra darajasida metabolik jarayonlarning izdan chiqishiga, oksidlovchi stressning kuchayishiga, fermentativ tizimlarning inaktivatsiyasiga hamda fotosintez apparatining funksional buzilishiga olib keladi. Natijada o'simliklarning o'sishi va rivojlanishi susayadi, hosildorlik kamayadi hamda butun ekotizim barqarorligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi.

Shu bilan birga, o'simliklar evolyutsiya jarayonida og'ir metallarning zararli ta'sirini cheklashga qaratilgan murakkab va samarali himoya-moslashuv mexanizmlarini shakllantirgan. Jumladan, fitoxelatinlar sintezi orqali metall ionlarining hujayra ichida bog'lab olinishi hamda ularning vakuolyar sekvestratsiya yo'li bilan metabolik faol hududlardan ajratilishi hujayraning hayotiy jarayonlarini saqlab qolishda muhim rol o'ynaydi. Ushbu mexanizmlar metall ionlarining fermentlar, hujayra membranalari va genetik apparatga yetkazadigan bevosita zararini kamaytirib, o'simliklarning toksik sharoitga nisbatan chidamliligini oshiradi.

Mazkur himoya tizimlarining molekulyar, biokimyoviy va genetik asoslarini chuqur o'rganish nafaqat fundamental biologiya va o'simliklar fiziologiyasi uchun, balki amaliy ekologiya uchun ham muhim ilmiy ahamiyatga ega. Xususan, fitoxelatin sintezi

va vakuolyar sekvestratsiya jarayonlarini boshqaruvchi mexanizmlarni chuqur tadqiq etish asosida og'ir metallarni yuqori darajada to'play oladigan, toksik muhitga chidamli o'simlik navlarini yaratish imkoniyatlari kengayadi. Bunday o'simliklardan fitoremediatsiya texnologiyalarida foydalanish sanoat chiqindilari bilan ifloslangan hududlarni ekologik jihatdan xavfsiz, iqtisodiy samarali va barqaror usulda tozalashga xizmat qiladi.

Xulosa qilib aytganda, og'ir metallarning o'simlik hujayralariga ko'rsatadigan salbiy ta'sir mexanizmlarini va ularga qarshi shakllangan moslashuv tizimlarini chuqur ilmiy asosda o'rganish nafaqat o'simliklarning ekologik stresslarga chidamliligini oshirish, balki atrof-muhitni muhofaza qilish, degradatsiyaga uchragan hududlarni tiklash hamda barqaror rivojlanish strategiyalarini ishlab chiqishda muhim nazariy va amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Okereafor U, Makhatha M, Mekuto L, Uche-Okereafor N, Sebola T, Mavumengwana V (2020) Toxic metal implications on agricultural soils, plants, animals, aquatic life and human health. *Int J Environ Res Public Health* 17(7):2204. 10.3390/ijerph17072204
2. Zamora-Ledezma C, Negrete-Bolagay D, Figueroa F, Zamora-Ledezma E, Ni M, Alexis F, Guerrero VH (2021) Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environ Technol Innovat* 22:101504. 10.1016/j.eti.2021.101504
3. MathuMitha C, Mohan Raj V, Sangeetha R (2021) Susan George and Ragumaran M.: a review on the effect of heavy metal contamination and its impact on the environment. *Intern J Zool Invest* 7:762–771. 10.33745/ijzi.2021.v07i02.061
4. Dey M, Akter A, Islam S, Chandra Dey S, Choudhury TR, Fatema KJ, Begum BA (2021) Assessment of contamination level, pollution risk and source apportionment of heavy metals in the Halda River water, Bangladesh. *Heliyon* 7(12):e08625. 10.1016/j.heliyon.2021.e08625
5. Chaitanya M, Arora S, Pal RS, Ali HS, El Haj B, Logesh R (2024) Assessment of Environmental Pollutants for Their Toxicological Effects of Human and Animal Health. Organic Micropollutants in Aquatic and Terrestrial Environments. Springer, Switzerland, pp 67–85
6. <https://geografiya.uz/ekologiya/819-ogir-metallar.html>
7. <https://www.gozetim.com/uz/cevre-analizleri/emisyon/agir-metal-olcumve-analizleri>
8. Металлы // Энциклопедический словарь юного химика. 2-е изд. /

Сост. В. А. Крицман, В. В. Станцо. — М.: Педагогика, 1990. — с. 141—144 Архивная копия от 4 марта 2016 на Wayback Machine. — 320 с. — ISBN 5-7155-0292-6

9. А. Т. Пилипенко, В. Я. Починок, И. П. Середа, Ф. Д.

Шевченко. Металлы. Общие свойства металлов // Справочник по элементарной химии / под ред. академика АН УССР А. Т. Пилипенко. — К.: Наукова думка, 1985. — С. 341—342. — 560 с

10. «Heavy metals» a meaningless term? Архивная копия от 31 марта 2010 на Wayback Machine — доклад ИЮПАК (англ.)

11. Ali H, Xon E, Ilahi I (2019) Xavfli og'ir metallarning atrof-muhit kimyosi va ekotoksikologiyasi: atrof-muhitning turg'unligi, toksikligi va bioakkumulyatsiyasi. J Chem 2019(1):6730305. 10.1155/2019/6730305

12. Li C, Sanchez GM, Wu Z, Cheng J, Zhang S, Wang Q, Li F, Sun G, Meentemeyer RK (2020) Spatiotemporal patterns and drivers of soil contamination with heavy metals during an intensive urbanization period (1989–2018) in southern China. Environ Pollut 260:114075. 10.1016/j.envpol.2020.114075

13. Pujari M, Kapoor D (2020) Heavy metals in the ecosystem: sources and their effects. Heavy Metals Environ. 10.1016/B978-0-12-821656-9.00001-8 [Google Scholar]

14. Sobhanardakani S (2019) Ecological and human health risk assessment of heavy metal content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah. Iran Biol Trace Element Res 187:602–610. 10.1007/s12011-018-1383-1

15. Alengebawy A, Abdelkhalek ST, Qureshi SR, Wang MQ (2021) Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications. Toxics 9(3):42. 10.3390/toxics9030042

16. Deng S, Zhang X, Zhu Y, Zhuo R (2024) Tuproqdagi og'ir metallar ifloslanishini fito-kombinatsiyalangan tiklashdagi so'nggi yutuqlar. Biotechnol Adv 72:108337. 10.1016/j.biotechadv.2024.108337

17. Li X, Lin S, Ouvrard S, Sirguy C, Qiu R, Wu B (2024) Tashlab ketilgan kondan bioko'mirga aylangan kashshof o'simlikning (Miscanthus sp.) atrof-muhitni tiklash salohiyati: og'ir metallarni barqarorlashtirish va atrof-muhitga qo'llash. J Environ Manage 366:121751. 10.1016/j.jenvman.2024.121751

18. Smail HO, Jamal SS, Nuraddin SA (2024) Iroqning Koya shahri/Kurdiston mintaqasida Allium cepa ildiz uchlarining mitotik indeksiga kanalizatsiya chiqindi suvlarining ta'siri. J Exp Mol Biol 25(3):133–140. 10.47743/jemb-2024-187

19. Xu E, Liu Y, Gu D, Zhan X, Li J, Zhou K, Zhang P, Zou Y (2024) O'simliklarning misga bo'lgan reaksiyasining molekulyar mexanizmlari: tanqislikdan ortiqchalikka. Inter

J Mol Sci 25(13):6993. 10.3390/ijms25136993

20. An Q, Wen C, Yan C (2024) Meta-tahlil mikroplastika va og'ir metallarning o'simliklarga birgalikdagi ta'sirini ochib beradi. J Hazard Mater 476:135028. 10.1016/j.jhazmat.2024.135028

21. Gao M, Peng H, Zhao X, Xiao Z, Qiu W, Song Z (2024) Kadmiyning bo'lingan ildiz tizimiga ekilgan petrushka ildizlarida polistirol tashishga ta'siri va birlashtirilgan toksik ta'sirlarni baholash. Sci Total Environ 924:171633. 10.1016/j.scitotenv.2024.171633

22. Elik Ü, Gül Z (2025) Makkajo'xori (Zea mays L.) tarkibida qo'rg'oshin va kadmiy metallarining to'planish salohiyati va fiziologik-morfologik xususiyatlarga ta'siri. Life 15(2):310. 10.3390/life15020310

23. Mohamed RR, Elshiekh AO, Mohamed AM, Abdul MM, Hamid K (2024a) Aqli polimerlar va ularning turli xil qo'llanilishi. Springer, Singapur

24. Zhou W, Wang Y, Liu W, Zhang L (2022) Og'ir metall stressi ostida o'simliklarda ROS signalizatsiyasi: So'nggi yutuqlar va kelajakdagi istiqbollar. J Hazard Mat 436:129214. 10.1016/j.jhazmat.2022.129214

25. Chen Z, Guo Z, Xu N, Khan MZ, Niu J (2024a) Multifaceted insights into the dual effects of foliar application of cerium oxide nanoparticles on alfalfa (Medicago sativa L.). Environ Sci: Nano 11:3457–3474. 10.1039/D4EN00271G