

Сведения об авторах:

Молдахметов Саят Сайранович* – PhD, Researcher (исследователь) кафедры энергетике и радиоэлектронике, «Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева», Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, тел.: 87713616822, e-mail: ssmoldahmetov@ku.edu.kz.

Абдуалиев Есенгельді Оспанұлы – докторант 2 курса ОП 8D07103 – Электроэнергетика, «Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева», Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, тел.: 87089515354, e-mail: eoabdualiev@ku.edu.kz.

Молдахметов Саят Сайранович* – PhD, «Энергетика және радиоэлектроника» кафедрасының зерттеушісі, «М.Козыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті», Қазақстан Республикасы, 150000 Петропавл қ., Пушкин көш., 86; тел.: 87713616822, e-mail: ssmoldahmetov@ku.edu.kz.

Абдуалиев Есенгельді Оспанұлы – «8D07103 – Электр энергетикасы» білім беру бағдарламасының 2-курс докторанты, «М. Козыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті», 150000, Қазақстан Республикасы, Петропавл қ., Пушкин көш., 86; тел.: 87089515354, e-mail: eoabdualiev@ku.edu.kz.

Moldakhmetov Sayat Sairanovich* – PhD, Researcher, Department of power engineering and radio electronics, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, 150000, Petropavlovsk, 86 Pushkin Str., tel.: 87713616822, e-mail: ssmoldahmetov@ku.edu.kz.

Abdualiyev Yessengeldi Ospanuly – 2nd-year PhD student, “8D07103 – Electric Power Engineering” educational program, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, 150000, Petropavlovsk, 86 Pushkin Str., tel.: 87089515354, e-mail: eoabdualiev@ku.edu.kz.

XFTAP 68.41.39

ӨОЖ 631.95:581.5:546.3

<https://doi.org/10.52269/SEPT2631161>

МЫС-АЛТЫН КЕНДЕРІ ҮЙНДІЛЕРІНДЕГІ ӨСІМДІКТЕР ҚАУЫМДАСТЫҚТАРЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫ ЖӘНЕ ЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ БИОЖИНАҚТАЛУЫ: ЗАМАНАУИ ЗЕРТТЕУ ТӘСІЛДЕРІ

Нугманов А.Б. – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, ауыл шаруашылығы ғылымдары факультетінің деканы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КеАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Божекенова Ж.Т.* – «8D05101-Биология» БББ докторанты, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КеАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Ысқақ А. – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, қолданбалы биотехнологиялық ғылыми-зерттеу институтының директоры, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КеАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Суюндиқова Ж.Т. – биология ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, «Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Мыс-алтын кен орындарының қалдық үйінділері мен қоймаларында өсімдік жамылғысының қалыптасу заңдылықтары мен элементтердің биожинақталу үдерістері жайлы соңғы жылдардағы ғылыми деректерді осы шолу мақаласында жүйелендірдік. Талдауға 2000-2025 жылдар аралығында Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar дерекқорларынан алынған жарияланымдар енгізілді; негізгі талап – мақаланың рецензиядан өтуі, сандық биоаккумуляция көрсеткіштерінің болуы және фиторемедиация тиімділігін бағалаудың ұсынылуы.

Жинақталған деректер техногенді субстраттарда өсімдіктің дамуын шектейтін негізгі себептердің қатарында ауыр металдардың жоғары шоғырлануы, органикалық заттар мен қоректік элементтердің тапшылығы, рН-тың экстремалды мәндері тұрғанын көрсетті. Табиғи ортада басым үдерісі – фитостабилизация болып табылады. Әдетте металдар өсімдіктің тамыр жүйесінде қалып, жерүсті мүшелеріне өте аз мөлшерде ауысады. Өсімдіктердің бірнеше түрлері – *Gliricidia sepium*, *Dodonaea viscosa*, *Sorghum bicolor* – жоғары биоаккумуляциялық қабілетімен ерекшеленеді. Ал биокөмір, органикалық қоспалар және PGPR бактерияларын (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) қолданатын көмекші фиторемедиация тәсілі металдың қозғалғыштығын төмендетіп, субстраттың қасиетін жақсартады, соның нәтижесінде рекультивация тиімділігі елеулі түрде артады. Қазақстандық зерттеулер бойынша *Sorghum bicolor* құрғақ континенттік климатта Pb, Cd, Co жинақтауға қабілетті перспективалы дақыл ретінде танылды. Осыған орай, келешекте биожинақталудың молекулалық механизмдерін терең зерттеп, аймақтық ерекшеліктерге сай мелиорациялық технологиялар жасау қажет болады. Қорытындылай келе, табиғи сукцессия үдерісі мен басқарылатын биотехнологиялық шараларды үйлестіру бұзылған жерлерді қалпына келтірудің ең ұтымды жолы екені айқындалды.

Түйінді сөздер: фиторемедиация, техногендік субстраттар, табиғи өсімдіктерді қалпына келтіру.

ФОРМИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ И БИОАККУМУЛЯЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ОТВАЛАХ МЕДНО-ЗОЛОТОЙ РУДЫ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нугманов А.Б. – к.с.-х.н., декан факультета сельскохозяйственных наук, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Божекенова Ж.Т.* – докторант ОП 8D05101 – Биология, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Ысқақ А. – к.с.-х.н., директор научно-исследовательского института инновационных технологий, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Суюндикова Ж.Т. – к.б.н., старший преподаватель, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва» г. Астана, Республика Казахстан.

В данном обзоре мы систематизировали научные данные последних лет о закономерностях формирования растительного покрова и процессах биоаккумуляции элементов в отвалах и хвостохранилищах медно-золотых месторождений. Анализ охватил публикации из баз данных Scopus, Web of Science, ScienceDirect и Google Scholar за 2000-2025 годы; ключевыми требованиями к отбору источников стали рецензируемость статьи, наличие количественных показателей биоаккумуляции и оценка эффективности фиторемедиации.

Собранные данные показали, что среди основных факторов, ограничивающих развитие растений на техногенных субстратах, – высокая концентрация тяжёлых металлов, дефицит органического вещества и питательных элементов, а также экстремальные значения pH. Преобладающим процессом в природных условиях выступает фитостабилизация: как правило, металлы удерживаются в корневой системе растения и лишь в незначительном количестве переходят в надземные органы. Ряд видов – *Gliricidia sepium*, *Dodonaea viscosa*, *Sorghum bicolor* – отличается высоким биоаккумуляционным потенциалом. При этом применение вспомогательной фиторемедиации с использованием биоугля, органических добавок и PGPR-бактерий (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) снижает подвижность металлов и улучшает свойства субстрата, благодаря чему эффективность рекультивации заметно возрастает. Согласно казахстанским исследованиям, *Sorghum bicolor* признан перспективной культурой, способной накапливать Pb, Cd и Co в условиях засушливого континентального климата. В связи с этим в дальнейшем необходимо глубже изучить молекулярные механизмы биоаккумуляции и разработать мелиоративные технологии, адаптированные к региональным особенностям. Подводя итог, можно заключить, что сочетание естественной сукцессии и управляемых биотехнологических мероприятий представляет собой наиболее рациональный путь восстановления нарушенных территорий.

Ключевые слова: фиторемедиация, техногенные субстраты, восстановление естественной растительности.

FORMATION OF PLANT COMMUNITIES AND BIOACCUMULATION OF ELEMENTS IN COPPER-GOLD ORE DUMPS: MODERN RESEARCH METHODS

Nugmanov A.B. – Candidate of Agricultural Sciences, Dean of the Faculty of Agricultural Sciences, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Bozhekenova Zh.T.* – PhD student, "8D05101-Biology" educational program, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Yskak A. – Candidate of Agricultural Sciences, Director of the Research Institute of Innovative Technologies, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Suyundikova Zh.T. – Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University NJSC, Astana, Republic of Kazakhstan.

In this review, we have systematized recent scientific data on the patterns of plant cover formation and the processes of elemental bioaccumulation in the waste dumps and tailings of copper-gold deposits. The analysis covered publications from the Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and Google Scholar databases for the period 2000–2025; the main selection criteria were peer-review status, the availability of quantitative bioaccumulation data, and an assessment of phytoremediation effectiveness.

The data gathered showed that the key factors limiting plant development on technogenic substrates include high concentrations of heavy metals, a shortage of organic matter and nutrients, and extreme pH values. The dominant process under natural conditions is phytostabilization: metals are typically retained in the root system, with only a small fraction translocated to the aboveground organs. Several species – *Gliricidia sepium*, *Dodonaea viscosa*, and *Sorghum bicolor* – stand out for their high bioaccumulation potential. Assisted

phytoremediation, relying on biochar, organic amendments, and PGPR bacteria (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), reduces metal mobility and improves substrate properties, substantially increasing the effectiveness of land reclamation. Studies conducted in Kazakhstan have identified Sorghum bicolor as a promising crop capable of accumulating Pb, Cd, and Co under arid continental conditions. Going forward, research should focus on uncovering the molecular mechanisms of bioaccumulation and developing amelioration technologies tailored to regional conditions. In conclusion, combining natural succession with managed biotechnological measures appears to be the most effective strategy for restoring disturbed lands.

Keywords: *phytoremediation, technogenic substrates, natural revegetation.*

Кіріспе. Тау-кен өнеркәсібі Қазақстан экономикасының негізгі салаларының бірі болып табылады және елдің өнеркәсіптік өндірісі мен экспорттық әлеуетіне айтарлықтай үлес қосады. Мысалы, Варварин кен орны карьерлерін (Қостанай облысы) 2004 жылдың маусымынан 2019 жылдың 31 желтоқсанына дейін пайдалану кезеңінде 112,5 миллион м³ немесе 281,2 миллион тонна тау-кен массасы өндірілді, оның ішінде 100,2 миллион м³ немесе 246,2 миллион тонна аршылған жыныстар және 34,7 миллион тонна тауарлық кен, орташа құрамы 0,93 г/т Au және 0,15% Cu. Баланстан тыс кеннің көлемі 5,3 миллион тоннаны құрайды [1, 19 б.].

Дегенмен кен өндіру мен өңдеу процесі үйінділер мен қалдық қоймалары түрінде үлкен көлемдегі техногенді қалдық қалдырады, нәтижесінде топырағы бұзылған, геохимиялық құрамы өзгерген аумақтар пайда болады. ҚР Экология және табиғи ресурстар министрлігінің Ұлттық баяндамасы бойынша, 2024 жылы елімізде бұзылған жерлердің жалпы ауданы 253,6 мың гектарға жеткен [2, 74 б.]. Ал Ұлттық статистика бюросының мәліметінше, 2023 жылы қауіпті қалдықтардың жалпы көлемі 43 867,9 мың тоннаны құраған, соның 65%-ы (28 077,9 мың тонна) дәл тау-кен және карьер өндірістерінің үлесінде [3, 130 б.]. Демек, техногенді үйінділерді жарамды топыраққа қайта айналдыру – тек экологиялық емес, сонымен қатар әлеуметтік-экономикалық маңызы зор мәселе.

Техногенді ландшафттардың физика-химиялық сипаттамалары – органикалық заттың тапшылығы, рН-тың шеткі мәндері, потенциалды токсикалық элементтердің (ауыр металдардың) жоғары шоғырлануы – өсімдік жамылғысының қайта қалыптасуына кедергі келтіреді [4, 825 б., 5, 2 б., 6, 877 б.].

Нәтижесінде фитоценоздардың дамуы тежеліп, табиғи қалпына келу қарқыны бәсеңдейді [5, 8 б., 7, 49 б.]. Дәл осындай жағдай бұзылған аумақтарды экологиялық реабилитациялауды табиғатты басқарудың басым бағыттарының біріне айналдырады.

Қазақстанның экологиялық заңнамасы бүлінген жерлерді рекультивациялау мен кейінгі мониторингті «Жер қойнауы және жер қойнауын пайдалану туралы» Кодексте белгіленген тәртіппен жүргізуді талап етеді, ал жер қойнауын игеру барысында ластануды болдырмайтын және қоршаған ортаға тигізетін зиянды азайтатын экологиялық қауіпсіз шаралар қолданылуы тиіс [8, 238-бап, 9, 6-бап, 54-бап].

Топырақтағы химиялық (потенциалды токсикалық) заттардың рұқсат етілетін шекті шоғырлануы, сондай-ақ тау-кен кәсіпорындары аумағының жай-күйін бақылау талаптары гигиеналық нормативтер мен санитарлық ережелермен реттеледі [10, 141-бап, 159-бап, 11, 1-кесте, 12, 1-тармақ].

Осындай бұзылған ландшафттарды қалпына келтірудің тиімді жолдарының бірі ретінде фиторемедиация қарастырылады – ластаушы заттарды (мысалы, ауыр металдарды) өсімдіктер көмегімен тұрақтандыру, жинақтау немесе басқа түрге ауыстыру принципіне негізделген әдіс [6, 871 б., 13, 3 б.]. Оның ішінде бірнеше нақты механизм бөлек қаралады: фитостабилизация кезінде өсімдік ластаушыны тамыр жүйесінде байланыстырады [7, 50 б., 14, 1007 б.], ал фитоэкстракция барысында зиянды заттар керісінше жерүсті мүшелерінде жинақталады [6, 872 б.]. Бұдан бөлек, көмекші фиторемедиация (assisted phytoremediation) деп аталатын тәсіл ерекше назар аудартады – мұнда топырақ сапасын жақсарту үшін биокөмір, органикалық қоспалар мен микроорганизм инокулянттары қосымша пайдаланылады [15, 179 б., 16, 153 б., 17, 1450 б.].

Фиторемедиациямен қатар табиғатта топырақтың өздігінен қалпына келу үдерісі, яғни сукцессия, да маңызды рөл атқарады: уақыт өте келе техногенді субстратқа бейімделген өсімдік түрлері алғашқы фитоқауымдастықтарды қалыптастыра бастайды [7, 51 б.]. Осындай пионерлі қауымдастықтардың пайда болу заңдылығын зерттеп, оның ішінен рекультивацияда пайдалануға жарамды перспективті түрлерді анықтауға болады [4, 833 б., 6, 878 б.]. Ал құрғақ климатты аймақтарда деградацияға ұшыраған жерлерді басқару мәселесі ерекше өзекті болып отыр, бұл ROOTS for Remediation секілді халықаралық жобалар мен «Құрғақ жерлердің тұрақты ландшафттарына әсер ету» бағдарламасында да көрініс тапқан [18 жоба, 19 бағдарлама].

Осы саладағы жұмыстардың саны жеткілікті болғанымен, олардың біразы жекелеген өсімдік түрлері немесе белгілі бір элементтер тобын қарастырады [4, 825 б., 6, 877б.], ал топырақтың геохимиясын, өсімдіктің биоаккумуляциялық қабілетін және «субстрат-өсімдік» жүйесіндегі сукцессиялық процестерді біріктіретін кешенді талдаулар жеткіліксіз. Бұған қоса, Орталық Азия мен Қазақстан секілді құрғақ, континентальды климаты өткір аймақтар бойынша толыққанды зерттеулер саны әлі де аз болып қалуда.

Осыған байланысты, аталған шолудың **мақсаты** – техногенді бүлінген жерлердің табиғи қалпына келу үдерісі мен өсімдіктердің биоаккумуляциялық қасиеттеріне қатысты соңғы жылдардағы ғылыми деректерді жүйелеп, климаттық-табиғи жағдайларды ескере отырып, фиторемедиацияның тиімділігін анықтайтын факторларды салыстырмалы талдау болып табылады.

Зерттеу міндеттері. Қойылған мақсатқа жету үшін төмендегі міндеттер шешілді:

- техногенді субстраттардың геохимиялық қасиеттерін (ауыр металдардың шоғырлануы, органикалық заттың мөлшері, рН деңгейі) талдап, олардың өсімдік дамуына тигізетін шектеуші әсерін анықтау;
- бұзылған жерлерде өсімдіктердің табиғи сукцессия жолымен қалыптасу заңдылықтарын, пионерлі түрлердің бейімделу механизмдерін жүйелеу;
- әртүрлі өсімдік түрлерінің ауыр металдарды биожинақтау және тасымалдау сипаттамаларын (BCF, TF көрсеткіштері негізінде) салыстырмалы түрде сипаттау;
- фитостабилизация, фитоэкстракция және көмекші фиторемедиация әдістерінің тиімділігін салыстырып, олардың қолдану аясы мен шектеулерін көрсету;
- Қазақстанның құрғақ континенттік климат жағдайында жергілікті және бейімделген өсімдік түрлерін (соның ішінде *Sorghum bicolor*) фиторемедиацияда қолдану перспективасын бағалау.

Мақаланың ғылыми жаңалығы – геоботаникалық, геохимиялық және биотехнологиялық тәсілдерді бір шеңберде қарастырып, техногенді бұзылған аймақтарды қалпына келтіру үдерісін кешенді талдауда, сондай-ақ өсімдік қауымдастықтарының қалыптасуы мен биоаккумуляция тиімділігіне әсер ететін негізгі факторларды нақтылауда жатыр.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу техногенді бұзылған аумақтардағы өсімдіктердің табиғи өсуі мен элементтердің биожиналу процестері туралы заманауи ғылыми деректерді жинақтауға, сондай-ақ фиторемедиация технологияларының тиімділігін бағалауға бағытталды. Жұмыс жүйелі шолу элементтерін қамтитын құрылымдалған әдебиеттік шолу форматында орындалды.

Әдебиет көзін іздеу стратегиясы. Ғылыми әдебиетті іздеу төрт халықаралық дерекқор – Scopus, Web of Science, ScienceDirect және Google Scholar – негізінде жүзеге асырылды, ал уақыт ауқымы ретінде 2000-2025 жылдар алынды: бұл кезең фиторемедиация мен техногенді ландшафттарды қалпына келтіру бағытындағы негізгі және соңғы жаңалықтарды толық қамтуға мүмкіндік берді.

Іздеу үшін ағылшын тіліндегі түйінді сөздер мен олардың AND/OR операторлары арқылы құрылған логикалық тіркестер қолданылды, соның ішінде: «фиторемедиация», «шахта қалдықтары», «техногендік субстраттар», «табиғи өсімдіктерді қалпына келтіру», «мыс-алтын кен қалдықтарының үйінділері», «ауыр металдардың биоаккумуляциясы», «фитостабилизация», «фитоэкстракция», «бұзылған жерлерде өсімдіктердің сукцессиясы», «топырақтың ластануы». Бұған қоса, негізгі мақалалардың сілтеме тізімдерін талдау (snowball approach) арқылы табылған қосымша дереккөздер де іріктемеге енгізілді – бұл релевантты әдебиеттің қамту шеңберін кеңейтуге септігін тигізді.

Енгізу және алып тастау критерийлері. Шолуға келесі критерийлерге сәйкес келетін жарияланымдар енгізілді:

- рецензияланатын ғылыми журналдарда жарияланған түпнұсқа және шолу мақалалары;
- жасанды қалдықтар алаңдарын (үйінділер, қалдық қоймалары, карьерлер) зерттеу;
- өсімдік түрлерінің құрамы, табиғи қалпына келтіру процестері немесе ауыр металдардың биожинақталу жылдамдығы туралы деректердің қолжетімділігі;
- фиторемедиация әдістерінің тиімділігін бағалау (фитостабилизация, фитоэкстракция, көмекші фиторемедиация);
- ағылшын және орыс тілдеріндегі басылымдар.

Талдаудан алынып тасталды:

- толық мәтіні жоқ конференция тезистері;
- сандық деректері жоқ немесе әдістемелік сипаттамасы жеткіліксіз жұмыстар;
- техногендік аймақтардағы топырақ және өсімдік жүйелеріне қатысы жоқ басылымдар;
- қайталанатын дереккөздер.

Дереккөзді таңдау процедурасы. Әдебиеттерді іріктеу процесі бірнеше кезеңде жүргізілді. Бірінші кезеңде кілт сөздер арқылы негізгі іздеу жүргізілді, нәтижесінде басылымдар базасы құрылды. Екінші кезеңде тақырыптар мен аңдатпаларды іріктеу арқылы релевантты емес жұмыстарды алып тастау көзделді. Үшінші кезеңде енгізу критерийлеріне сәйкес келетін мақалалардың толық мәтінді талдауы жүргізілді.

Қайталанатын жазбалар алдын ала өңдеу кезеңінде алынып тасталды. Қорытынды іріктемеге критерийлерге сәйкес келетін және табиғи-климаттық жағдайлар, техногендік субстрат түрлері мен фиторемедиация тәсілдері бойынша репрезентативтілікті қамтамасыз ететін зерттеулер енгізілді.

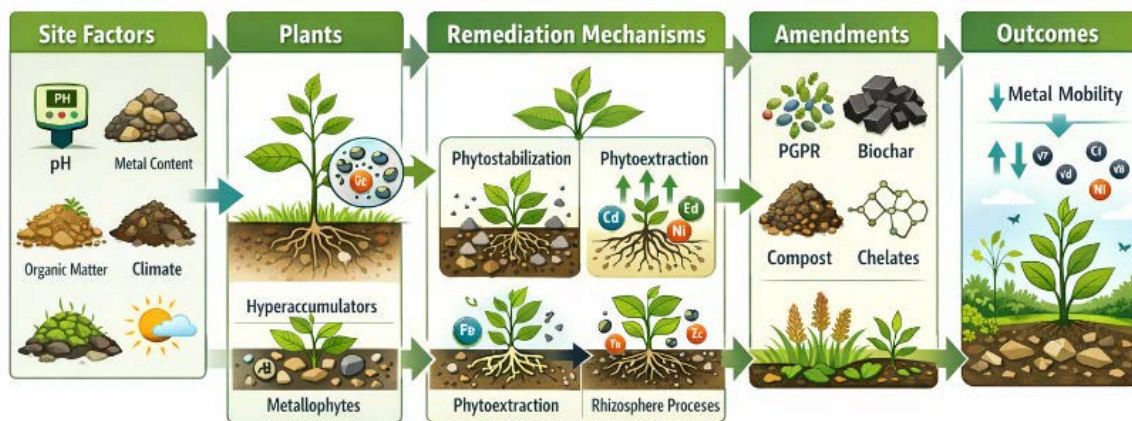
Деректерді талдау тәсілі. Іріктеуден өткен дереккөздерді талдау салыстырмалы және жүйелік тәсілдерді қолдану арқылы жүргізілді. Әртүрлі зерттеулердің нәтижелерін салыстыру үшін келесі параметрлер ескерілді:

- техногенді нысан түрі (үйінділер, қалдық қоймалар, карьерлер);
- географиялық орналасуы және климаттық жағдайлары;
- субстраттың физика-химиялық сипаттамалары (рН деңгейі, органикалық заттың мөлшері, ауыр металдардың шоғырлануы);
- зерттелетін өсімдік түрлерінің құрамы мен экологиялық ерекшеліктері;
- биожинақтау көрсеткіштері (аккумуляция мен транслокация коэффициенттері).

Талдау барысында ерекше көңіл «топырақ-өсімдік» жүйесіндегі элементтердің таралу үлгілерін анықтауға және әртүрлі қалпына келтіру тәсілдерінің тиімділігін салыстырмалы бағалауға бөлінді.

Зерттеудің шектеулері. Шолуға кірген зерттеулер қолданылған аналитикалық әдістер, зерттеу нысандары, климаттық жағдайлар мен биожинақтау көрсеткіштерінің әртүрлілігімен ерекшеленеді. Мұндай гетерогенділік нәтижелерді тікелей сандық түрде салыстыруды қиындатады, сондықтан қорытынды жасау барысында белгілі бір сақтық қажет.

Нәтижелерді талқылау. Талданған әдеби деректер техногенді үйінділер мен қалдық қоймаларындағы өсімдік қауымдастықтарының қалыптасуы – геохимиялық, климаттық және биологиялық факторлардың өзара тоғысуымен анықталатын күрделі, көпқырлы құбылыс екенін растайды. Қоршаған орта факторлары, өсімдіктердің биологиялық ерекшеліктері және техногенді субстраттардың фиторемедиация механизмдері арасындағы өзара әрекеттесудің жалпыланған сызбасы 1-суретте көрсетілген.



1 сурет – Техногенді субстраттарды фиторемедиациялаудың тұжырымдамалық сызбасы: қоршаған орта факторларының, өсімдік түрлерінің, қалпына келтіру механизмдерінің және көмекші технологиялардың ауыр металдардың қозғалғыштығын азайтуға және экожүйелерді қалпына келтіруге әсері

Соңғы екі онжылдықта тау-кен қалдықтары үйінділеріндегі өсімдіктердің ауыр металдардың биожиналуына арналған зерттеулер саны айтарлықтай өсті. Бұл зерттеулердің нәтижелерін жүйелеу және салыстыру үшін биожиналудың негізгі параметрлері, фиторемедиация процестерінің түрлері және оларды жүзеге асыру шарттары 1-кестеде қорытындыланған.

1 кесте – Техногенді субстраттардағы биоаккумуляция мен фиторемедиацияның салыстырмалы талдауы

Автор, жылы	Нысан	Металдар	Өсімдіктер	Процесстің түрі	Механизм (BCF/TF)	Жағдайы/әсері	Негізгі қорытынды
Xiao et al., 2008	Мыс үйінділері (Қытай)	Cu, Pb, Zn, Cd	Жабайы флора (49 түрі)	Табиғи сукцессия	BCF >1 (ішінара)	Табиғи жағдайлар	Металлофиттердің жоғары алуантүрлілігі
Santibáñez et al., 2008	Мыс қалдық қоймалары (Чили)	Cu, Zn	<i>Lolium perenne</i>	Фитостабилизация	TF <1	Биосолдтер	Cu, Zn қозғалғыштығы артты, тек Mo төмендеді
Wilson-Corral et al., 2011	Au-Cu қалдық қоймалары (Мексика)	Au, Cu	<i>Helianthus annuus</i>	Фитоэкстракция	BCF >1	Хелаттар	Au экстракциясы мүмкін, бірақ өсімдіктердің стрессі
Närhi et al., 2012	Fe-Cu қалдық қоймалары (Финляндия)	Cu	Батпақты өсімдіктері	Сукцессия	–	Суық климат	Биоалуантүрлілігінің >50% төмендеуі
Lago-Vila et al., 2014	Мыс қалдық қоймалары (Испания)	Cu, Mn, Ni	–	Геохимия	–	Жоғары қозғалғыштық	Биоаккумуляцияны анықтау

1-кестенің жалғасы

Chen et al., 2015	Қышқылды мыс қалдық қоймалары (Қытай)	Cu, As	<i>Medicago sativa</i>	Фитостабилизация	TF <1	Қышқылдыр Н орта	Тамырдағы металдар
Lam et al., 2017	Мыс қалдық қоймалары (Чили)	Cu, Mn, Zn	<i>Schinus molle</i> , <i>Atriplex</i>	Фитоаккумуляция	BCF >1	Микориза	Жинақтаудың артуы
Tapia et al., 2017	Мыс қалдық қоймалары (Чили)	Cu	<i>Carpobrotus</i>	Фитостабилизация	TF <1	Гуматтар	Cu стабилизациясы
Touceda-González et al., 2017	Мыс кенінің қалдық қоймалары (Испания)	Cu	Шөптесін өсімдіктер	Көмекші фиторемедиация	Қолжетімділік ↓	Компост	Топырақ пен микробиотаның сапасын жақсарту
Kasowska et al., 2018	Польшаның флотациядан кейінгі мыс қалдықтары	Cu, Mn	Жабайы флора	Сукцессия	BCF >1	–	Металдардың аккумуляторлары (жинақтаушылары)
Mendoza-Hernández et al., 2019	Қалдық қоймалары (Мексика)	Pb, Cd	<i>Brassica juncea</i>	Фитоэкстракция	BCF ↑	PGPR бактерия	Экстракцияны белсендету
Festin et al., 2019	Мыс қалдық қоймалары (Замбия)	Cu	Ағаштар	Сукцессия	BCF <1	–	Металдардың эксклюдерлері
Afonso et al., 2020	Мыс қалдық қоймалары (Бразилия)	Cu, Cr, Pb	Жергілікті флора	Биологиялық барлау	BCF >1	–	11 перспективті түр
Ruiz-Huerta et al., 2022	Қалдық қоймалары (Мексика)	Cu, Zn, As	<i>Zea mays</i>	Тәуекелділік	TF <1	–	Өсімдіктерге уытты әсері
Mussali-Galante et al., 2023	Қалдық қоймалары (Мексика)	Fe, Pb, Zn, Cu	<i>Gliricidia sepium</i>	Фитоэкстракция	BCF >1	–	Аккумуляцияның жоғары деңгейі
Rosas-Ramírez et al., 2024	Қалдық қоймалары (Мексика)	Pb, Cd	<i>Crotalaria</i>	Көмекші фиторемедиация	Қолжетімділік ↓	Biochar	Уыттылықтың төмендеуі
Wang et al., 2024	Мыс қалдық қоймалары (Қытай)	Cu, Cd	<i>Lolium perenne</i>	Фитоэкстракция	TF ↑	Хелаттар	Экстракцияның жоғарылауы
Acosta-Núñez et al., 2025	Қалдық қоймалары (Мексика)	Pb, Cd	<i>Dodonaea viscosa</i>	Фитоэкстракция	BCF >1	–	Жоғары потенциал
Sagimbayeva et al., 2025	Қазақстан	Pb, Cd, Co	<i>Sorghum bicolor</i>	Фитостабилизация	BCF >1	In vitro	Перспективті түр
Yelikbayev et al., 2026	Қазақстан	Co, Pb, Cu	А/ш дақылдары	Фитостабилизация	TF <1	–	Жергілікті адаптация

1-кесте көрсетіп тұрғандай, зерттеу нәтижелері бойынша өсімдіктердің ауыр металдармен әрекет ету механизмдері түрдің биологиялық қасиеттеріне және қоршаған орта жағдайларына байланысты нақты сараланғанын байқауға болады.

Зерттеулерді салыстырмалы талдауы нәтижесінде фиторемедиацияның тиімділігі мен табиғи өсімді анықтайтын жалпы заңдылықтар айқындалды.

1. Өсімдіктер үшін техногенді бүлінген субстраттардың геохимиялық шектеулері. Тау-кен өндірістерінің үйінділері мен қоймаларында органикалық қоректік заттың жетіспеуі немесе мүлде болмауы, ауыр металдардың жоғары шоғырлануы және рН-тың шеткі мәндері – өсімдік жамылғысының қалыптасуын тежейтін негізгі геохимиялық факторлар. Бұлар пионерлі түрлердің алғашқы отарлануына кедергі келтіріп, стресстік орта қалыптастырады және сукцессия қарқынын баяулатады [20, 159 б.].

Сонымен қатар, субстраттағы металдардың (Cu, Mn, Ni) қозғалғыштық деңгейі де өсімдіктің даму сапасына тікелей әсер етіп, биоаккумуляция процесін күшейтеді [20, 164 б.]. Мыс қалдық үйінділердің қышқылды субстраттарында фитоуыттылық әсері жоғарылайды [21, 32 б.] және өсімдіктердің өсуіне кедергі болып, өсімдік қауымдастықтардың алуан түрлілігін төмендетеді. Финляндияның солтүстігінде темір-мыс кен қалдықтарында сарқынды сулардың әсерінен өсімдіктердің алуантүрлілігі 50%-ға дейін төмендегенін көрсетті [22, 60 б.].

2. Табиғи сукцессия және өсімдіктердің бейімделу қабілеті. Уақыт өткен сайын техногенді бүлінген территорияларда да өсімдіктердің жеке түрлері бекінеді, кейін салыстырмалы тұрақты фитоценоздарды қалыптастырады. 1-ші суретте беріген деректемелер бойынша фитостабилизация мен фитоэкстракция үдерістері кезінде өсімдіктің жерүсті мүшелері мен тамыр жүйесінің және бүлінген топырақ арасындағы әрекеттесу жолдары әртүрлі іске асады. Осы үдерістерге қатысатын өсімдіктердің морфологиялық-физиологиялық бейімделу ерекшеліктері болады және олар металдардың уытты әсеріне төзімді болып келеді.

Бразилияда мыс балқыту зауытының қалдық үйінділерінде өскен аборигендік флорасын биобарлау кезінде фиторемедиация үшін потенциалы жоғары өсімдіктердің 11 түрі анықталды. Олардың барлығы өздерінің биомассасында ауыр металдарды жинауға бейімделген, Cu, Pb, Cr-ға төзімді екені белгілі болды [23, № 109953]. Қытайда мыс балқыту зауыттарының үйінділері бар бес учаскеде зерттеу жүргізілді: Аньхой провинциясының Тунлин қаласындағы Угунли, Тунгуаншан және Фэнхуаншан; Цзянсу провинциясының Нанкин қаласындағы Туншань; және Чжэцзян провинциясының Чжуцзи қаласындағы Сяоцзянцун. Оның нәтижесінде Cu, Pb, Zn, Cd металдарын жинау қабілеті жоғары өсімдіктердің 49 түрі анықталды [24, 315-317 б.]. Бұл жабайы флораның өзгермелі экологиялық жағдайына бейімделу потенциалының кең диапазонын көрсетеді. Дегенмен, әр түрлі географиялық аймақтарда жүргізілген зерттеулерге назар аударатын болсақ, техногендік субстраттарда қайта қалыптасқан фитоценоз бен фондық экожүйе арасындағы флористикалық құрамы мен құрылымындағы айтарлықтай айырмашылықтарды байқауға болады. Бұған Замбиядағы зерттеу деректері дәлел бола алады. Замбиядағы мыс кен өндірісінің қалдық қоймаларын басқан өсімдік жамылғысының алуантүрлілігі мен жергілікті табиғи экожүйенің алуантүрлілігін салыстырған кезде ұқсастық коэффициенті 16-26 %-ды құрады [25, 118 б.]. Бұл көрсеткіш бұзылған топырақтарда ерекше спецификалық өсімдік қауымдастықтардың қалыптасатынын бейнелейді. Өсімдік ағзасының маңызды адаптация белгілері келесі:

- металдардың жинақталуына төзімділік;
- тез өсу қабілеті;
- микоризалық ассоциациялардың қалыптасуы;
- азотты бекіту қабілеті.

Зерттелген өсімдіктердің көп түрлері металлофит-эксклюдер бағытында қызмет атқарады. Олар металды жерүсті биомассасына (сабақ, жапырақ, гүл, тұқым) өткізбей тамыр жүйесіне жинайды ($BCF < 1$) [25, 124 б.]. Гипераккумулятор түрлері санаулы ғана. Демек, табиғи жағдайларда өсімдіктердің бейімделу бағытында фитостабилизация үдерістері басым болады.

3. Металдардың биожинақталуы және таралуы. Металдың өсімдік ағзасына енуі мен таралуы өсімдік түрінің биологиялық ерекшеліктеріне де, техногенді субстраттың құрамы мен қасиеттеріне де тәуелді. Әдетте өсімдіктің тамыр жүйесінде шоғырланған металл жерүсті мүшелеріне тарамайды, сөйтіп оның уытты әсері төмендейді [21, 33 б.]. Бірақ, өсімдіктердің кейбір өкілдері металды ағза бойына жинауға бейімделген. Оған келесі зерттеулердің мәліметтері дәлел бола алады:

- *Gliciridia sepium* өсімдігі Fe, Pb, Zn, Cu аккумуляциялауға бейімделген [26, 38982 б.];
- *Dodonaea viscosa* өкілі Pb мен Cd экстракциялау потенциалы жоғары [27, № 69];
- *Sorgum bicolor* өсімдік түрінің Pb, Cd, Co сіңіру қасиеті бар [28, № 3627];
- *Lolium perenne* хелат агенттері қоспасының көмегімен Cu, Cd бойына жинауды арттырады [29, № 7663].

Ғылыми қызығушылықты тудыратын асыл металдарды биоаккумуляциялау туралы деректемелер. Мұндай қасиет *Helianthus annuus* пен *Kalanchoe serrata* өкілдерінде анықталған. Олар Au мен Cu металдарын бойларына сіңіреді [30, 1488 б.]. Дегенмен бұл жолда белгілі бір қиындықтар бар – процесті толық бақылау мүмкіндігі шектеулі, ал фитоэкстракцияны күшейту үшін хелат қосу қажет болады, ол өз кезегінде өсімдіктің өсу қарқынын баяулатып, субстраттың қайта ластану қаупін арттырады.

Ауыл шаруашылық дақылдарының биоаккумуляциялық қасиеті де кейде теріс салдарға әкелуі мүмкін. Мысалы, қалдық қоймалары маңында өсірілген *Zea mays* дақылында Cu, Zn, As жинақталуына байланысты морфологиялық ауытқулар мен өнімділіктің төмендеуі байқалды [31, 447 б.].

4. Фиторемедиация технологияларының тиімділігі. Жинақталған зерттеу нәтижелерін салыстыру табиғи сукцессияның жеке өзі техногенді жерлерді жедел қалпына келтіру үшін жеткіліксіз екенін көрсетеді, сондықтан басқарылатын фиторемедиация тәсілдерін қолдану қажеттілігі туындайды. Негізгі әдістердің механизмі, тиімділігі мен қолдану аясы 2-кестеде салыстырмалы түрде берілген.

2 кесте – Техногендік субстраттардағы ауыр металдарды фиторемедиациялаудың негізгі әдістерінің салыстырмалы сипаттамалары

Әдіс	Әрекет механизмі	Негізгі көрсеткіштер (BCF, TF)	Артықшылықтары	Шектеулер	Қолдану саласы	Дереккөзі
Фитостабилизация	Ризосферадағы металдардың иммобилизациясы, тамырларға адсорбциялануы, қозғалғыштығының төмендеуі	BCF>1 (тамыр), TF<1	Экологиялық қауіпсіздігі, металдардың миграциясын азайту, эрозияның алдын алу	Металдар жүйеден алынбайды	Қатты ластанған қалдық қоймалары мен үйінділер	Mendez & Maier, 2008; Kidd et al., 2015
Фитоэкстракция	Металды тамырлармен сіңіру және оны жерүсті биомассасында жинау	BCF>1, TF>1	Металды шынайы алып тастау, құнды элементтерді алу мүмкіндігі	Баяу процесс, өсімдіктер үшін улы	Орташа ластанған топырақ	Ali et al., 2013; Ghosh & Singh, 2005
Ризофльтрация	Сулы ортадан металды тамырмен сіңіру және адсорбциялау	BCF >1 (тамыр)	Сулы ерітінділерді тазарту үшін тиімді	Сулы ортамен шектелген	Дренаждық сулар, ағынды сулар	Ali et al., 2013
Фитостимуляция (ризодеградация)	Ластаушы заттардың трансформациясы үшін ризосфера микроорганизмдерінің ролын ынталандыру	BCF/TF арқылы анықталмайды	Микробтық белсенділіктің артуы, топырақ сапасының жақсаруы	Ластаушы заттарды жанама түрде жою	Органикалық ластағыш тар (ауыр металдар үшін шектеулі)	Ghosh & Singh, 2005
Көмекші фиторемедиация	тиімділікті арттыру үшін қоспаларды қолдану (biochar, PGPR, хелаттар) для повышения эффективности	BCF және/немесе TF жоғарлайды	Тиімділіктің айтарлықтай артуы, экстремалды жағдайларға бейімделу	Құны, қайталама ластану қаупі (хелаттар)	Жоғары деңгейде бұзылған техногенді субстраттар	Bolan et al., 2014; Houben et al., 2013
Биокөмірді қолдануға негізделген фитостабилизация	Металдар сорбциясы + топырақ сапасының жақсаруы	Биожетімділік төмен дейді	Уыттылықтың төмендеуі, рН жоғарылауы	Металды жоймайды	Қышқылдық қалдық қоймалары	Bolan et al., 2011; Houben et al., 2013

Фитостабилизация. Фитостабилизация қалдық қоймалары үшін ең көп таралған стратегия болып табылады (1, 2-кесте). Оны 1-кестеде келтірілген деректер растайды, мұнда көптеген түрлер төмен транслокация коэффициенттерін көрсетеді (TF<1), бұл фитостабилизация механизмдерінің басым екенін көрсетеді. Фитостабилизация тиімділігі бірқатар зерттеулермен расталды:

- *Lolium perenne* биосолиттермен қолдану Cu мен Zn концентрациясын арттырады, бірақ фитотоксикалық белгілер байқалмайды, ал Mo сіңірілуін төмендетеді [32, 1 б.];
- *Carobrotus aequilatus* мысты тиімді тұрақтандырады [33, 102 б.]. Фиторемедиация тиімділігінің негізгі факторларының бірі – нақты қоршаған орта жағдайларына бейімделген жергілікті өсімдік түрлерін пайдалану болып келеді [34, 210 б.].

Фитоэкстракция. 1-кестенің деректері көрсеткендей, тек шектеулі өсімдік түрлері ғана жоғары биоконцентрация коэффициенттерімен (BCF>1) сипатталады, бұл табиғи жағдайында фитоэкстракцияның шектеулерін растайды. Фитоэкстракция механизмдері өсімдіктің өсу қарқындылығына әсер етпей, жерүсті биомассасында металдарды жинақтау қабілетіне тәуелді. Табысты зерттеулердің мысалына қарамастан (PGPR бактерияларын қосып *Brassica juncea* өсімдігін өсіру) [35, №126308], фито-

экстракцияны қолдану қоршаған ортаның уыттылығымен және өсімдік биомассасының төмен көрсеткіштерімен шектеледі (2 кесте).

Көмекші фиторемедиация. Фиторемедиацияның ұтымды түрі «assisted phytoremediation» – деп аталады, «көмекші» немесе «қосымша» мағынада. Бұл әдіс қалпына келтіру процесін жеделдету үшін қосымша компоненттерді (микроорганизм инокулянттарын, органикалық қоспаларды, биокөмірді) пайдалануымен ерекшеленеді. Мысалы, *Serratia K120*, *Enterobacter K125*, *Serratia MC107*, *Serratia MC119* және *Enterobacter MC156* бактерияларын қолданған зерттеуде де осындай тәсіл негізге алынған. *Brassica juncea* тамыр жүйесінің колонизациясы металдардың өсімдікке енуіне оң әсерін тигізеді және өсімдіктің стресс жағдайын реттейді [35, №126308]. Қатты тұрмыстық (органикалық) қалдықтарды компостирлеп мыс кен қалдықтарын фиторемедиациялау үшін пайдалану туралы ауқымды (үш жыл) дала зерртеулердің нәтижелері бойынша субстраттың қышқылды рН ортасы бейтараптанады және ризосфералық микрофлорасына оңтайлы әсер етеді [36, 301 б.]. Biochar компонентін қолдануға арналған зерттеулерге сүйенетін болсақ, кокос талшықтарынан жасалған биокөмірді (25%) қалдық субстраттарға (75%) қосқан кезде ауыр металдардың қозғалғыштығы төмендеудің есебінен өсімдік ағзасына уытты әсері басылады, яғни, фитостабилизация үрдістері артады [37, №2516].

Демек, рекультивация әдістердің жеке түрін қолданғанша, оларды кешенді біріктіріп қолдану алдеқайда тиімдірек екенін тұжырымдамалық сызба айқын көрсетеді (1-сурет). «Субстрат-өсімдік» жүйесіндегі субстрат жағдайларының өзгеруіне және өсімдіктер төзімділігінің жоғарылауына байланысты жақсы нәтижелерге жетуге болады.

5. Қазақстан бойынша мәліметтер. Орталық Азия құрғақ климат жағдайларында фиторемедиация үдерістері бойынша ғылыми мәселелер бар. Оларды шешу жолында жергілікті зерттеулердің нәтижелері маңызды. Жүгері мен күнбағыс дақылдардың биомассасы жақсы дамығанымен, олар металдарды тамырдан жоғары өткізбейтіні ($TF < 0,8$) Теміртау маңындағы зерттеулер барысында анықталды [38, №64]. Бұл дақылдардың бейімделуі фитостабилизация жолымен іске асады. *Sorghum bicolor* өсімдігі металдардың улы әсеріне төзімділік танытып Pb, Cd, Co жинақтау қабілеттілігі анықталды [28, № 3627]. Қазақстанның аридті климаты жағдайында бұл өсімдіктерді қолдану потенциалы өте жоғары.

Бірінші кестенің мәліметтерінен келесі маңызды қорытындыларды жасауға болады:

- техногенді бүлінген топырақтардың геохимиялық қасиеттері өсімдіктер үшін негізгі шектеуші фактор болып табылады;
- бүлінген топырақтарда қалыптасқан өсімдік қауымдастықтары тұрақты болғанымен, табиғи экожүйелерден ерекшеленеді;
- табиғатта фитостабилизация механизмдері фитоэкстракцияға қарағанда басым болып келеді;
- екінші кестенің мәліметтері қалдық қоймалардағы өсімдік жамылғысы үшін фитостабилизация стратегиясының қолайлығын көрсетеді;
- фиторемедиацияның тиімділігін арттыру үшін кешенді, көмекші әдістерді біріктіріп пайдаланған дұрыс;
- топырақтарды қайта қалпына келтіру үшін жергілікті, қолайсыз жағдайларда тіршілікті жалғастыруға бейімделген өсімдік түрлерінің потенциалы жоғары.

Қорытынды. Ғылыми әдебиеттердің деректемелері бойынша мыс-алтын кен орындардың үйінділерінде өсімдік жамылғысының қалыптасуы геохимиялық, климаттық және биологиялық факторларға тәуелді. Техногенді субстраттардың экстремалды қолайсыз жағдайлары өсімдік тіршілігін тежегенімен, ерекше тұрақты фитоценоздардың қалыптасуын толықтай шектемейді.

Жабайы табиғат жағдайында фитостабилизация механизмдері жий кездеседі: өсімдік металдарды тамырына жинап оның жоғары өтуін шектейді. Бір қатар өсімдіктердің аккумуляция қабілеті жоғары. Олар асыл металдарды да жинақтай алады. Сондықтан мұндай түрлер фитоэкстракция үшін өте маңызды болып табылады.

Қосымша әдістерді қолдану субстраттың қасиеттерін жақсартып фиторемедиацияны арттырады. Ол үшін жергілікті, экологиялық бейімделген түрлерді пайдалану ұтымды. Осы мақсатта Қазақстандағы құрғақ климат үшін *Sorghum bicolor* өсімдігінің маңыздылығы көрсетілді.

Бұзылған аумақтарды қалпына келтірудің ең тиімді стратегиясы табиғи сукцессия мен басқарылатын биотехнологиялық әдістердің үйлесімі болып табылады. Болашақ зерттеулер биоаккумуляцияның молекулалық механизмдерін анықтауға, қайта қалыптасып жатқан фитоценоздарды бақылауға және аймақтық ерекшеліктеріне бейімделген технологияларын әзірлеуге бағытталуы керек.

Қаржыландыру бойынша ақпарат. Зерттеу жұмыстары 2024 жылы Ахмет Байтұрсынұлы атындағы ҚӨУ-де 2024-2026 жылдарға арналған ғылыми және (немесе) ғылыми-техникалық жобалар бойынша гранттық қаржыландыру аясында BR24992839 «Қостанай облысының ауыл шаруашылығы жерлері мен өнімдеріне экотоксиканттар мен инновациялық агротехнологиялардың әсерін зерттеу» тақырыбындағы жобасы негізінде жүзеге асырылды.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

ӘДЕБИЕТТЕР:

1. ТОО «Проектсервис». Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) в составе рабочего проекта «План горных работ месторождения "Варваринское"». Открытые горные работы по состоянию на 01.01.2021 г. – Караганда: ТОО «Проектсервис», 2021.
2. Қазақстан Республикасының экология және табиғи ресурстар министрлігі. Қоршаған ортаның жай-күйі және табиғи ресурстарды пайдалану туралы Ұлттық баяндама, 2024 [Электрондық ресурc]. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/documents/1?lang=en> (жүгінген күні: 03.03.2026).
3. Ұлттық статистика бюросы. Қазақстан Республикасының Стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігі [Электрондық ресурc]. – URL: <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-org/publications/182318/> (жүгінген күні: 03.03.2026).
4. Kasowska, D. Heavy metal and nutrient uptake in plants colonizing post-flotation copper tailings / D. Kasowska, K. Gediga, Z. Spiak // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – Vol. 25. – P. 824–835. – DOI: 10.1007/s11356-017-0451-y.
5. Santini, T.C. Extreme Geochemical Conditions and Dispersal Limitation Retard Primary Succession of Microbial Communities in Gold Tailings / T. C. Santini, M. Raudsepp, J. Hamilton, J. Nunn // Frontiers in Microbiology. – 2018. – Vol. 9. – Art. 2785. – DOI: 10.3389/fmicb.2018.02785.
6. Ali, H. Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications / H. Ali, E. Khan, M. A. Sajad // Chemosphere. – 2013. – Vol. 91. – P. 869–881. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075.
7. Mendez, M.O. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments / M. O. Mendez, R. M. Maier // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. – 2008. – Vol. 7. – P. 47–59. – DOI: 10.1007/s11157-007-9125-4.
8. Қазақстан Республикасының Экология кодексі: 2021 жылғы 2 қаңтардағы № 400-VI ҚРЗ [Электрондық ресурc]. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/K2100000400> (жүгінген күні: 03.03.2026).
9. Жер қойнауы және жер қойнауын пайдалану туралы Қазақстан Республикасының Кодексі: 2017 жылғы 27 желтоқсандағы № 125-VI ҚРЗ (2025 жылғы қаңтардағы өзгерістермен) [Электрондық ресурc]. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/K1700000125> (жүгінген күні: 03.03.2026).
10. Қазақстан Республикасының Жер кодексі: 2003 жылғы 20 маусымдағы № 442 Кодекс (2025 жылғы қаңтардағы өзгерістермен) [Электрондық ресурc]. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/K030000442> (жүгінген күні: 03.03.2026).
11. Тіршілік ету ортасының қауіпсіздігіне арналған гигиеналық нормативтерді бекіту туралы: Қазақстан Республикасы Денсаулық сақтау министрінің 2021 жылғы 21 сәуірдегі № ҚР ДСМ-32 бұйрығы. Тіркелген: 22.04.2021, № 22595 [Электрондық ресурc]. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/V2100022595> (жүгінген күні: 03.03.2026).
12. Жерге мониторинг жүргізу жөніндегі әдістемені бекіту туралы: Қазақстан Республикасы Ауыл шаруашылығы министрінің 2022 жылғы 10 тамыздағы № 250 бұйрығы. Тіркелген: 11.08.2022, № 29085 [Электрондық ресурc]. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/V2200029085> (жүгінген күні: 03.03.2026).
13. Ghosh, M. A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of Its Byproducts / M. Ghosh, S. P. Singh // Applied Ecology and Environmental Research. – 2005. – Vol. 3, № 1. – P. 1–18. – DOI: 10.15666/aeer/0301_001018.
14. Kidd, P. Agronomic Practices for Improving Gentle Remediation of Trace Element-Contaminated Soils / P. Kidd, M. Mench, V. Álvarez-López [et al.] // International Journal of Phytoremediation. – 2015. – Vol. 17, № 11. – P. 1005–1037. – DOI: 10.1080/15226514.2014.1003788.
15. Bolan, N. S. Phytostabilization: A Green Approach to Contaminant Containment / N. S. Bolan, J. H. Park, B. Robinson [et al.] // Advances in Agronomy / ed. D. L. Sparks. – Academic Press, 2011. – Vol. 112. – P. 145–204. – DOI: 10.1016/B978-0-12-385538-1.00004-4.
16. Bolan, N. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize? / N. Bolan, A. Kunhikrishnan, R. Thangarajan [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2014. – Vol. 266. – P. 141–166. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.018.
17. Houben, D. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar / D. Houben, L. Evrard, P. Sonnet // Chemosphere. – 2013. – Vol. 92, № 11. – P. 1450–1457. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.03.055.
18. ROOTS for Remediation: Collaborative Phytoremediation in Post-Catastrophe Environments [Электрондық ресурc]: исследовательский проект / Linnaeus University. – URL: <https://www.lnu.se/en/research/research-projects/project-roots-for-remediation---collaborative-phytoremediation-in-post-catastrophe-environments/> (жүгінген күні: 03.03.2026).
19. Программа воздействия на устойчивые ландшафты засушливых земель (DSL-IP) [Электрондық ресурc] / Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО). – URL: <https://www.fao.org/countryprofiles/news-archive/detail-news/ru/c/1741723/> (жүгінген күні: 03.03.2026).
20. Lago-Vila, M. Phytoavailable content of metals in soils from copper mine tailings (Touro mine, Galicia, Spain) / M. Lago-Vila, D. Arenas-Lago, L. Andrade, F. A. Vega // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – Vol. 147, Part B. – P. 159–166. – DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.07.001.

21. Chen, F. **Physiological responses and accumulation of heavy metals and arsenic of *Medicago sativa* L. growing on acidic copper mine tailings in arid lands** / F. Chen, S. Wang, S. Mou [et al.] // Journal of Geochemical Exploration. – 2015. – Vol. 157. – P. 27–35. – DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.05.011.
22. Närhi, P. **Effect of tailings on wetland vegetation in Rautuvaara, a former iron–copper mining area in northern Finland** / P. Närhi, M. L. Räisänen, M.-L. Sutinen, R. Sutinen // Journal of Geochemical Exploration. – 2012. – Vol. 116–117. – P. 60–65. – DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.03.005.
23. Afonso, T. F. **Bioprospection of indigenous flora grown in copper mining tailing area for phytoremediation of metals** / T. F. Afonso, C. F. Demarco, S. Pieniz [et al.] // Journal of Environmental Management. – 2020. – Vol. 256. – Art. 109953. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109953.
24. Xiao, W. L. **Bioaccumulation of Heavy Metals by Wild Plants Growing on Copper Mine Spoils in China** / W. L. Xiao, C. L. Luo, Y. H. Chen [et al.] // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2008. – Vol. 39, № 3–4. – P. 315–328. – DOI: 10.1080/00103620701826415.
25. Festin, E. S. **Biological traits of tropical trees suitable for restoration of copper-polluted lands** / E. S. Festin, C. Salk, M. Tigabu [et al.] // Ecological Engineering. – 2019. – Vol. 138. – P. 118–125. – DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.07.010.
26. Mussali-Galante, P. **The bioaccumulation potential of heavy metals by *Gliricidia sepium* (Fabaceae) in mine tailings** / P. Mussali-Galante, M. Santoyo-Martínez, M. L. Castrejón-Godínez [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – Vol. 30. – P. 38982–38999. – DOI: 10.1007/s11356-022-24904-7.
27. Acosta-Núñez, L.F. **In Situ Phytoremediation of Mine Tailings with High Concentrations of Cadmium and Lead Using *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae)** / L. F. Acosta-Núñez, P. Mussali-Galante, M. L. Castrejón-Godínez [et al.] // Plants. – 2025. – Vol. 14, № 1. – Art. 69. – DOI: 10.3390/plants14010069.
28. Sagimbayeva, A. M. **Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soil Using Drought-Adapted Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) in Arid Regions of Kazakhstan** / A. M. Sagimbayeva, N. B. Tomlekova, G. A. Saparov [et al.] // Plants. – 2025. – Vol. 14, № 23. – Art. 3627. – DOI: 10.3390/plants14233627.
29. Wang, W. **Extraction of heavy metals from copper tailings by ryegrass (*Lolium perenne* L.) with the assistance of degradable chelating agents** / W. Wang, J. Xue, L. Zhang [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Art. 7663. – DOI: 10.1038/s41598-024-58486-w.
30. Wilson-Corral, V. **Phytoextraction of gold and copper from mine tailings with *Helianthus annuus* L. and *Kalanchoe serrata* L.** / V. Wilson-Corral, C. Anderson, M. Rodríguez-Lopez [et al.] // Minerals Engineering. – 2011. – Vol. 24, № 13. – P. 1488–1494. – DOI: 10.1016/j.mineng.2011.07.014.
31. Ruiz-Huerta, E. A. **Bioaccumulation of heavy metals and As in maize (*Zea mays* L.) grown close to mine tailings strongly impacts plant development** / E. A. Ruiz-Huerta, M. A. Armienta-Hernández, J. G. Dubrovsky [et al.] // Ecotoxicology. – 2022. – Vol. 31. – P. 447–467. – DOI: 10.1007/s10646-022-02522-w.
32. Santibáñez, C. **Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*** / C. Santibáñez, C. Verdugo, R. Ginocchio // Science of The Total Environment. – 2008. – Vol. 395, № 1. – P. 1–10. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.12.033.
33. Tapia, Y. **Phytostabilization of Cu in mine tailings using native plant *Carpobrotus aequilaterus* and the addition of potassium humates** / Y. Tapia, P. Bustos, O. Salazar [et al.] // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – Vol. 183, Part A. – P. 102–113. – DOI: 10.1016/j.gexplo.2017.10.008.
34. Lam, E. J. **Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile** / E. J. Lam, M. Cánovas, M. E. Gálvez [et al.] // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – Vol. 182, Part B. – P. 210–217. – DOI: 10.1016/j.gexplo.2017.06.015.
35. Mendoza-Hernández, J. C. **Phytoremediation of mine tailings by *Brassica juncea* inoculated with plant growth-promoting bacteria** / J. C. Mendoza-Hernández, O. R. Vázquez-Delgado, M. Castillo-Morales [et al.] // Microbiological Research. – 2019. – Vol. 228. – Art. 126308. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126308>.
36. Touceda-González, M. **Aided phytostabilisation reduces metal toxicity, improves soil fertility and enhances microbial activity in Cu-rich mine tailings** / M. Touceda-González, V. Álvarez-López, Á. Prieto-Fernández [et al.] // Journal of Environmental Management. – 2017. – Vol. 186, Part 2. – P. 301–313. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.09.019.
37. Rosas-Ramírez, M. **Assisted Phytoremediation between Biochar and *Crotalaria pumila* to Phytostabilize Heavy Metals in Mine Tailings** / M. Rosas-Ramírez, E. Tovar-Sánchez, A. Rodríguez-Solís [et al.] // Plants. – 2024. – Vol. 13, № 17. – Art. 2516. – DOI: 10.3390/plants13172516.
38. Yelikbayev, B. K. **Plant Accumulation of Metals from Soils Impacted by the JSC Qarmet Industrial Activities, Central Kazakhstan** / B. K. Yelikbayev, K. Rysbekov, A. Sankabayeva [et al.] // Environments. – 2026. – Vol. 13, № 1. – Art. 64. – DOI: 10.3390/environments13010064.

REFERENCES:

1. Proektservis LLP. **Ocenka vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu (OVOS) v sostave rabocheho proekta «Plan gorny'h rabot mestorozhdeniya "Varvarinskoe"»** [Environmental impact

assessment (EIA) as part of the mining operations plan for the Varvarinskoye deposit]. Karaganda, Proektservis LLP, 2021. (In Russian)

2. **Kazakstan Respublikasynyn e'kologiya zhane tabigi resurstar ministriligi. Korshagan ortanyn zhaj-kui zhane tabigi resurstardy paidalanu turaly ulttyk bayandama, 2024** [Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan. National report on the state of the environment and use of natural resources, 2024]. Available at: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/documents/1?lang=en> (accessed 3 March 2026). (In Kazakh)

3. **Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan.** Available at: <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-org/publications/182318/> (accessed 3 March 2026). (In Kazakh)

4. **Kasowska D., Gediga K., Spiak Z. Heavy metal and nutrient uptake in plants colonizing post-flotation copper tailings.** *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, pp. 824-835. DOI: 10.1007/s11356-017-0451-y.

5. **Santini T.C., Raudsepp M., Hamilton J., Nunn J. Extreme geochemical conditions and dispersal limitation retard primary succession of microbial communities in gold tailings.** *Frontiers in Microbiology*, 2018, vol. 9, art. 2785. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02785.

6. **Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications.** *Chemosphere*, 2013, vol. 91, pp. 869-881. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075.

7. **Mendez MO, Maier RM. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments.** *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2008, vol. 7, pp. 47-59. DOI: 10.1007/s11157-007-9125-4.

8. **Kazakstan Respublikasynyn E'kologiya kodeksi: 2021 zhylygy 2 kantardagy № 400-VI KRZ** [Ecological Code of the Republic of Kazakhstan dated 2 January 2021, No. 400-VI]. Available at: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/K2100000400> (accessed 3 March 2026). (In Kazakh)

9. **Zher kojnauly zhane zher kojnauly pajdalanu turaly Kazakstan Respublikasynyn Kodeksi: 2017 zhylygy 27 zheltokсандagy № 125-VI KRZ (2025 zhylygy kantardagy өзгерістермен)** [Code of the Republic of Kazakhstan on Subsoil and Subsoil Use dated 27 December 2017, No. 125-VI]. Available at: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/K1700000125> (accessed 3 March 2026). (In Kazakh)

10. **Kazakstan Respublikasynyn Zher kodeksi: 2003 zhylygy 20 mausymdagy № 442 Kodeks (2025 zhylygy kantardagy өзгерістермен)** [Land Code of the Republic of Kazakhstan: Code No. 442 dated June 20, 2003 (with amendments as of January 2025)]. Available at: https://adilet.zan.kz/kaz/docs/K030000442_ (accessed 3 March 2026). (In Kazakh)

11. **Tirshilik etu ortasynyn kauipsizdigine arналған gigenalyk normativterdi bekitu turaly: Kazakstan Respublikasy Densaulyk saktau ministrinin 2021 zhylygy 21 sauirdegi № ҚР DSM-32 bujrygy. Tirkelgen: 22.04.2021, № 22595** [On approval of hygienic standards for environmental safety, Order No. QR DSM-32, 2021]. Available at: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/V2100022595> (accessed 3 March 2026). (In Kazakh)

12. **Zherge monitoring zhurgizu zhonindegi adistemeni bekitu turaly: Kazakstan Respublikasy Auyl sharuashylygy ministrinin 2022 zhylygy 10 tamyzdagy № 250 bujrygy. Tirkelgen: 11.08.2022, № 29085** [On Approving the Methodology for Conducting Land Monitoring: Order of the Minister of Agriculture of the Republic of Kazakhstan No. 250 dated August 10, 2022. Registered: August 11, 2022, No. 29085]. Available at: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/V2200029085> (accessed 3 March 2026). (In Kazakh)

13. **Ghosh M., Singh S.P. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts.** *Applied Ecology and Environmental Research*, 2005, vol. 3, no. 1, pp. 1-18. DOI: 10.15666/aeer/0301_001018.

14. **Kidd P., Mench M., Álvarez-López V., et al. Agronomic practices for improving gentle remediation of trace element-contaminated soils.** *International Journal of Phytoremediation*, 2015, vol. 17, no. 11, pp. 1005-1037. DOI: 10.1080/15226514.2014.1003788.

15. **Bolan N.S., Park J.H., Robinson B., et al. Phytostabilization: a green approach to contaminant containment.** *Advances in Agronomy*, 2011, vol. 112, pp. 145-204. DOI: 10.1016/B978-0-12-385538-1.00004-4.

16. **Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan R., et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – to mobilize or to immobilize?** *Journal of Hazardous Materials*, 2014, vol. 266, pp. 141-166. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.018.

17. **Houben D., Evrard L., Sonnet P. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar.** *Chemosphere*, 2013, vol. 92, no. 11, pp. 1450-1457. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.03.055.

18. **Linnaeus University. ROOTS for Remediation: Collaborative Phytoremediation in Post-Catastrophe Environments.** Available at: <https://www.lnu.se/en/research/research-projects/project-roots-for-remediation---collaborative-phytoremediation-in-post-catastrophe-environments/> (accessed 3 March 2026).

19. **Prodovol'stvennaya i sel'skhozaystvennaya organizaciya OON (FAO). Programma vozdejstviya na ustojchivye landshafty' zasushlivy'h zemel (DSL-IP)** [Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Dryland Sustainable Landscapes Impact Program]. Available at: <https://www.fao.org/countryprofiles/news-archive/detail-news/ru/c/1741723/> (accessed 3 March 2026). (In Russian)

20. Lago-Vila M., Arenas-Lago D., Andrade L., Vega F.A. Phytoavailable content of metals in soils from copper mine tailings (Touro mine, Galicia, Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 147, part B, pp. 159-166. DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.07.001.
21. Chen F., Wang S., Mou S., et al. Physiological responses and accumulation of heavy metals and arsenic of *Medicago sativa* L. growing on acidic copper mine tailings in arid lands. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 157, pp. 27-35. DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.05.011.
22. Närhi P., Räisänen M.L., Sutinen M.L., Sutinen R. Effect of tailings on wetland vegetation in Rautuvaara, a former iron-copper mining area in northern Finland. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, vol. 116-117, pp. 60-65. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.03.005.
23. Afonso T.F., Demarco C.F., Pieniz S., et al. Bioprospection of indigenous flora grown in copper mining tailing area for phytoremediation of metals. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 256, art. 109953. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109953.
24. Xiao W.L., Luo C.L., Chen Y.H., et al. Bioaccumulation of heavy metals by wild plants growing on copper mine spoils in China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2008, vol. 39, no. 3-4, pp. 315-328. DOI: 10.1080/00103620701826415.
25. Festin E.S., Salk C., Tigabu M., et al. Biological traits of tropical trees suitable for restoration of copper-polluted lands. *Ecological Engineering*, 2019, vol. 138, pp. 118-125. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.07.010.
26. Mussali-Galante P., Santoyo-Martínez M., Castrejón-Godínez M.L., et al. The bioaccumulation potential of heavy metals by *Gliricidia sepium* (Fabaceae) in mine tailings. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, pp. 38982-38999. DOI: 10.1007/s11356-022-24904-7.
27. Acosta-Núñez L.F., Mussali-Galante P., Castrejón-Godínez M.L., et al. In situ phytoremediation of mine tailings with high concentrations of cadmium and lead using *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae). *Plants*, 2025, vol. 14, no. 1, art. 69. DOI: 10.3390/plants14010069.
28. Sagimbayeva A.M., Tomlekova N.B., Saparov G.A., et al. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soil using drought-adapted sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) in arid regions of Kazakhstan. *Plants*, 2025, vol. 14, no. 23, art. 3627. DOI: 10.3390/plants14233627.
29. Wang W., Xue J., Zhang L., et al. Extraction of heavy metals from copper tailings by ryegrass (*Lolium perenne* L.) with the assistance of degradable chelating agents. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. 7663. DOI: 10.1038/s41598-024-58486-w.
30. Wilson-Corral V., Anderson C., Rodriguez-Lopez M., et al. Phytoextraction of gold and copper from mine tailings with *Helianthus annuus* L. and *Kalanchoe serrata* L. *Minerals Engineering*, 2011, vol. 24, no. 13, pp. 1488-1494. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.07.014.
31. Ruiz-Huerta E.A., Armienta-Hernández M.A., Dubrovsky J.G., et al. Bioaccumulation of heavy metals and As in maize (*Zea mays* L.) grown close to mine tailings strongly impacts plant development. *Ecotoxicology*, 2022, vol. 31, pp. 447-467. DOI: 10.1007/s10646-022-02522-w.
32. Santibáñez C., Verdugo C., Ginocchio R. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. *Science of the Total Environment*, 2008, vol. 395, no. 1, pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.12.033.
33. Tapia Y., Bustos P., Salazar O., et al. Phytostabilization of Cu in mine tailings using native plant *Carpobrotus aequilaterus* and the addition of potassium humates. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 183, part A, pp. 102-113. DOI: 10.1016/j.gexplo.2017.10.008.
34. Lam E.J., Cánovas M., Gálvez M.E., et al. Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 182, part B, pp. 210-217. DOI: 10.1016/j.gexplo.2017.06.015.
35. Mendoza-Hernández JC, Vázquez-Delgado OR, Castillo-Morales M, et al. Phytoremediation of mine tailings by *Brassica juncea* inoculated with plant growth-promoting bacteria. *Microbiological Research*, 2019, vol. 228, art. 126308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126308>.
36. Touceda-González M., Álvarez-López V., Prieto-Fernández Á., et al. Aided phytostabilisation reduces metal toxicity, improves soil fertility and enhances microbial activity in Cu-rich mine tailings. *Journal of Environmental Management*, 2017, vol. 186, part 2, pp. 301-313. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.09.019.
37. Rosas-Ramírez M., Tovar-Sánchez E., Rodríguez-Solís A., et al. Assisted phytoremediation between biochar and *Crotalaria pumila* to phytostabilize heavy metals in mine tailings. *Plants*, 2024, vol. 13, no. 17, art. 2516. DOI: 10.3390/plants13172516.
38. Yelikbayev B.K., Rysbekov K., Sankabayeva A., et al. Plant accumulation of metals from soils impacted by the JSC Qarmet industrial activities, Central Kazakhstan. *Environments*, 2026, vol. 13, no. 1, art. 64. DOI: 10.3390/environments13010064.

Жіберілген күні: 25 мамыр 2026 ж. Қабылданған күні: 26 маусым 2026 ж.

Жарияланған күні: 30 қыркүйек 2026 ж.

Авторлар туралы мәліметтер:

Нугманов Алмабек Батыржанович – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, ауыл шаруашылығы ғылымдары факультетінің деканы, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Абай даңғ. 28/1, e-mail: almabek.nugmanov@bk.ru.

Божекенова Женискуль Турсынбаевна* – «8D05101-Биология» БББ докторанты, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КеАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000 Қостанай қ., Абай даңғ. 28/1, e-mail: Bozhekenova@mail.ru.

Ысқақ Алия – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, инновациялық технологиялар ғылыми-зерттеу институтының директоры, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000 Қостанай қ., Абай даңғ. 28/1, e-mail: alia-almaz@mail.ru.

Суюндиқова Жанар Тулеутаевна – биология ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, «Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Қазақстан Республикасы, 010008, Астана қ., Қаныш Сәтбаев көш., 2; e-mail: forwork.zhanar@mail.ru.

Нугманов Алмабек Батыржанович – к.с.-х.н., декан факультета сельскохозяйственных наук, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, прос., Абая 28/1, e-mail: almabek.nugmanov@bk.ru.

Божекенова Женискуль Турсынбаевна* – докторант ОП 8D05101 – Биология, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, прос., Абая 28/1, e-mail: Bozhekenova@mail.ru.

Ысқақ Алия – к.с.-х.н., директор научно-исследовательского института инновационных технологий, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, прос., Абая 28/1, e-mail: alia-almaz@mail.ru.

Суюндиқова Жанар Тулеутаевна – к.б.н., старший преподаватель, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва», Республика Казахстан, 010008, г. Астана, ул. Қаныш Сәтбаев (Сатпаева), 2, e-mail: forwork.zhanar@mail.ru.

Nugmanov Almbek Batyrzanovich – Candidate of Agricultural Sciences, Dean of the Faculty of agricultural sciences, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 28/1 Abai Str., e- mails: almabek.nugmanov@bk.ru.

Bozhekenova Zheniskul Tursynbayevna* – PhD student, “8D05101-Biology” educational program, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 28/1 Abai Str., e- mails: Bozhekenova@mail.ru.

Yskak Aliya – Candidate of Agricultural Sciences, Director of the Research Institute of Innovative Technologies, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 28/1 Abai Str., e- mails: alia-almaz@mail.ru.

Suyundikova Zhanar Tuleutayevna – Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University NJSC, Republic of Kazakhstan, 010008, Astana, 2 Kanysh Satbayev Str., e-mail: forwork.zhanar@mail.ru.

МРНТИ 31.27.21, 87.15.19

УДК 633/635.954. 633.11:632.9

<https://doi.org/10.52269/SEPT2631174>

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕРБИЦИДНОЙ ОБРАБОТКИ И
СНИЖЕНИЕ ПЕСТИЦИДНОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАВ НА ПОСЕВАХ
ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ СТЕПНОЙ ЗОНЫ АКМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ**

Нургазиев Р.Е. – кандидат сельскохозяйственных наук, ассоциированный профессор кафедры сельского хозяйства и биоресурсов, НАО «Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова», г. Кокшетау, Республика Казахстан.

Аужанова М.А. – кандидат сельскохозяйственных наук, ассоциированный профессор кафедры сельского хозяйства и биоресурсов, НАО «Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова», г. Кокшетау, Республика Казахстан.

Бекимова Г.Б.* – доктор PhD, ассоциированный профессор кафедры сельского хозяйства и биоресурсов, НАО «Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова», г. Кокшетау, Республика Казахстан.

Аширов А.Р. – магистрант кафедры сельского хозяйства и биоресурсов, НАО «Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова», г. Кокшетау, Республика Казахстан.

В статье представлены результаты двухлетних исследований, проведенных в условиях степной зоны Акмолинской области в 2025–2026 гг., по оценке эффективности применения герби-