

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

MFTA 87.21.09

DOI: 10.51886/1999-740X_2026_1_86

А. Қазез¹, К. Бексейтова¹, Ұ. Жантیکеев^{1*}, М. Тоқтар¹, С. Азат¹**ТОПЫРАҚТЫ РЕМЕДИАЦИЯЛАУДАҒЫ БИОКӨМІРДІҢ МЕХАНИЗМДЕРІ,
ТИІМДІЛІГІ ЖӘНЕ ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ӘСЕРІ**¹Satbayev University, 050013, Алматы, Сәтбаев көшесі, 22а, Қазақстан,

*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

Аңдатпа. Ауыр металдардың, пестицидтердің және органикалық ластаушы заттардың жинақталуына байланысты топырақтың ластануы бүкіл әлемді алаңдатып отыр. Бұл шолу мақалада биокөмірдің ауыр металдарды иммобилизациялаудағы, пестицидтердің уыттылығын төмендетудегі, топырақ құнарлығын және микроорганизмдердің белсенділігін арттырудағы рөліне назар аударып отырып, топырақты қалпына келтірудің тиімді әдісі ретінде биокөмірді зерттейді. Биокөмірдің жоғары бетінің ауданы мен кеуекті құрылымы оны ластаушы заттардың белсенділігін төмендетуде және топырақ сапасын жақсартуда өте тиімді биоматериал болып табылады. Шолу сонымен қатар тұрақты ауылшаруашылық тәжірибесіне биокөмірді топыраққа енгізу мөлшеріне, тереңдігіне, топырақ механикалық құамы бойынша ауылшаруашылық дақылдарының өнімділігіне және экожүйені жақсартуға ықпал ететін көміртекті секвестрлеудегі және климаттың өзгеруін азайтудағы биокөмірдің маңызды рөлін қарастырған. Сонымен бірге, биокөмір топырақтың микробиологиялық белсенділігін арттыратынын, топырақтағы қоректік заттардың айналымы мен органикалық заттардың ыдырауын реттеп, топырақ құрылымын жақсартады, су ұстау және катион алмасу қабілетін арттырады, топырақты құнарлылығын сақтайды және эрозияға бейімділігін азайтады. Сондықтан тұрақты ауыл шаруашылығы мен қоршаған ортаны басқарудағы биокөмірдің әлеуеті айқын, көптеген зерттеулер оның топырақ сапасын жақсартудағы және топырақтың ластануының әсерін азайтудағы маңызды рөлін айқындайды.

Түйінді сөздер: биокөмір, қоршаған орта, топырақ, ауыр металл, климаттық өзгерістер, биоремедиация.

КІРІСПЕ

Өнеркәсіптік қалдықтармен топырақтың ластануы ауыл шаруашылығы өнімділігіне, азық-түлік қауіпсіздігіне және биоәртүрлілікке тікелей әсер ететін ең маңызды жаһандық экологиялық проблемалардың бірі болып табылады. Көптеген жылдар бойы өнеркәсіптік қызмет, химиялық тыңайтқыштарды шамадан тыс пайдалану және қоршаған ортаға зиянды әртүрлі қалдықтардың дұрыс өңделмеуі топырақта ластаушы заттардың жиналуына әкелді.

Ластаушы заттар топырақ құнарлылығын нашарлатып қана қоймай, адам денсаулығы мен қоршаған ортаға үлкен қауіп төндіреді [1]. Осы мәліметтер бойынша топырақтың ластануы ауыл шаруашылығы өнімділігінің төмендеуіне ықпал ететіндігі, дүниежүзі-

лік топырақтың 30%-дан астамында ластану салдарынан деграциялық белгілері байқалуда.

Топырақтың қорғасын (Pb), кадмий (Cd) және мышьяк (As) сияқты ауыр металдармен ластануы өсімдіктерде уыттылыққа әкеліп қана қоймайды, сонымен қатар бұл металдардың қоректік тізбекте жиналуына әкеліп соқтырады, бұл адам денсаулығына айтарлықтай қауіп төндіреді [2]. Ауыр металдар биологиялық ыдырамайтын ерекшелігіне байланысты топырақта ұзақ уақыт сақталады, соның нәтижесінде топырақ құнарлылығының төмендеуіне алып келеді, бұл бүкіл әлем бойынша ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігіне кері әсерін тигізеді [3].

Ауыр металдардан басқа, синтетикалық пестицидтерді қолдану да топы-

рақтың деградациясына ықпал етеді. Пестицидтер зиянкестермен күресуде тиімді болғанымен, топырақтың микробиологиялық қауымдастықтарын бұзады, биологиялық әртүрлілікті азайтады және су көздерін ластайды [4]. Нәтижесінде топырақтың экологиялық стресс-терге төзімділігі төмендейді, бұл экожүйенің және ауыл шаруашылығының тұрақтылығы үшін ұзақ мерзімдік проблемаларды туындатады.

Топырақтың ластануы үрдістері ұлғайған сайын оны қалпына келтіру стратегияларының қажеттілігі өзекті мәселелерге айналып отыр. Осы мәселеге байланысты биокөмір технологиясының соңғы жетістіктері топырақтың ластануын азайту үшін перспективалы шешімдердің бірі болып табылады. Әсіресе оның ауыр металдарды иммобилизациялау, пестицидтердің уыттылығын азайту және топырақтың құнарлылығын қалпына келтіру қабілеті жоғары. Органикалық материалдардың пиролизі арқылы өндірілетін биокөмір топырақ құнарлығын арттыру, микробиологиялық белсенділікті арттыру және зиянды ластаушы заттардың белсенділігін төмендету үшін тиімді құрал ретінде қолданылып келеді [5].

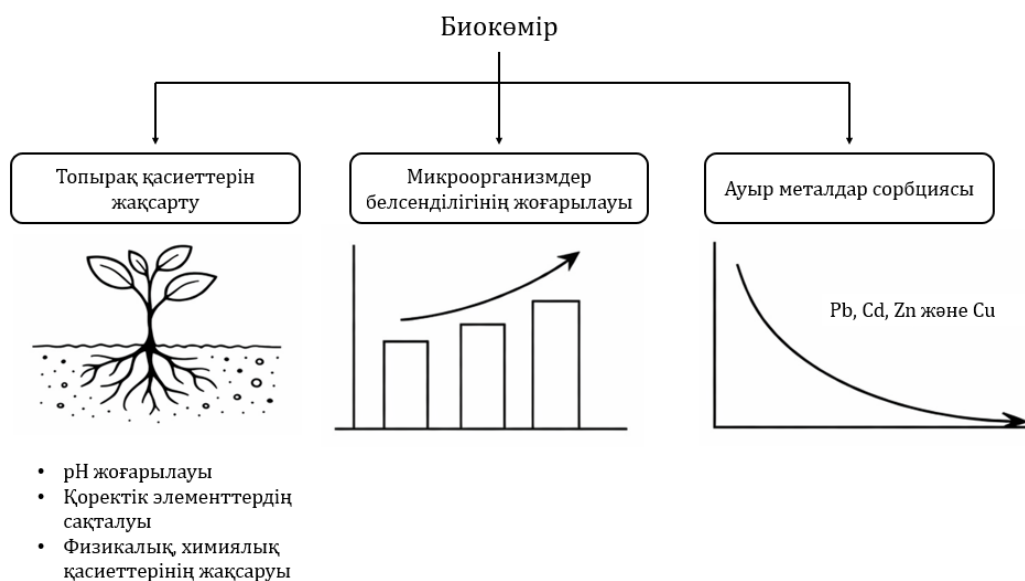
НЕГІЗГІ БӨЛІМ

Биокөмір және топырақты қалпына келтіру. Қорғасын (Pb), кадмий (Cd), мышьяк (As) және сынап (Hg) сияқты ауыр металдар ауылшаруашылық топырақтарын ластаушы заттардың бірі болып табылады [6]. Топырақтағы Pb және Cd деңгейінің жоғарылауы топырақтың микробиологиялық әртүрлілігін және егін өнімділігін төмендетеді, сонымен бірге ұзақ мерзімді экологиялық зиян келтіреді [7] ауыр металдар топырақта ұзақ уақыт бойы сақталады, бұл топырақты дәстүрлі әдістермен қалпына келтіру ұзақ мерзімді алады және тиімділігі төмен болып табылады [8]. Олардың сақталуы қоршаған ортаға, әсіресе ауылшаруашылық аймақтарға үлкен қауіп төндіреді. Шын мәнінде,

соңғы зерттеулер мышьяк және кадмий сияқты ауыр металдар топырақтың сапасын нашарлатып қана қоймайды, сонымен қатар жер асты суларының және қоршаған экожүйелердің ластануына, олардың экологиялық және адам денсаулығына қауіп-қатерінің күшейіп келе жатқаны байқалады [9].

Осы өсіп келе жатқан мәселеге жауап ретінде биокөмір топырақты қалпына келтірудің тиімді құралы ретінде маңыздылыққа ие болып келеді. Ауылшаруашылық қалдықтары сияқты органикалық материалдардың пиролизінен алынған көміртегіге бай өнім биокөмір топырақтың физикалық, химиялық және биологиялық қасиеттерін жақсарту арқылы топырақтың құнарлылығын жақсарты алады (сурет 1). Биокөмірдің ластаушы заттарды иммобилизациялау, қоректік заттардың сақталуын арттыру және микробиологиялық белсенділікті арттыру қабілеті оны топырақтың ластануымен күресудің оңтайлы шешімі болып табылады [10]. Ол әсіресе ауыр металдармен және органикалық ластаушы заттармен ластанған топырақтарда тиімді, онда ол ластаушы заттарды ұстай алады және олардың белсенділігін төмендетеді, осылайша олардың өсімдіктер мен жануарларға түсуіне жол бермейді [11, 12].

Ластанған топырақтағы ауыр металдарды иммобилизациялаудағы биокөмірдің маңыздылығы жоғары [13]. Биокөмірдің кеуекті құрылымы мен жоғары бетінің ауданы өте жоғары адсорбциялық қабілетке ие, бұл ион алмасу және электростатикалық әрекеттесу арқылы металл иондарын адсорбциялауға мүмкіндік береді [12]. Биокөмірдің Pb, Cd және Cu сияқты металдардың, әсіресе қалалық және ауылшаруашылық топырақтарында белсенділігін тиімді төмендетіп, топырақ құрылымын жақсартатыны, су ұстау және катион алмасу қабілетін (ЦЭҚ) арттырып, топырақтың эрозияға бейімділігін төмендетеді [7].



Сурет 1 - Топырақты ремедиациялаудағы биокөмірдің механизмдері [10]

Ластанған топыраққа биокөмірді енгізгеннен кейін микробиологиялық қауымдастықтың биомассасын жоғарылататыны, пайдалы микроорганизмдердің өсуіне ықпал ететіні және органикалық заттардың ыдырауын күшейтетіні анықталды [14]. Микроорганизмдер үшін тіршілік ету ортасы ретінде қызмет ете отырып, биокөмір қоректік заттардың айналымын жақсартуға көмектеседі және топырақ сапасын жақсартады, бұл әсіресе ауыр металдар сияқты ластаушы заттардың әсерінен бүлінген топырақтар үшін маңызды болып табылады [15, 16].

Топырақ құрылымын жақсарту және су ұстау қабілетін арттыру арқылы биокөмір топырақтың құрғақ климаттық ортаға төзімділігін артыруға көмектеседі және эрозия қаупін азайтады [5, 17].

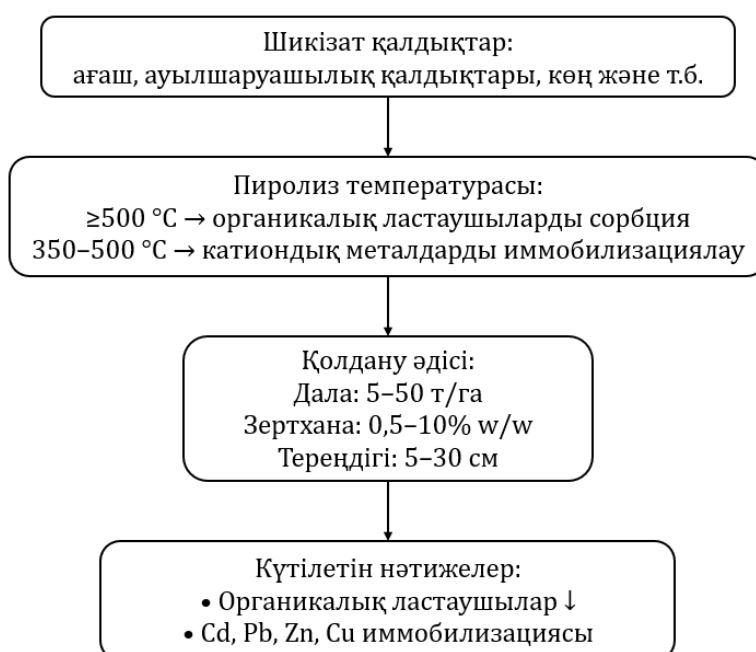
Қорытындылай келе, биокөмір топырақтың ластану мәселесіне жанжақты және тұрақты шешім ұсынады. Оның ауыр металдарды иммобилизациялау, топырақ құнарлығын арттыру және микробтардың белсенділігін жақсарту қабілеті оны топырақты қалпына келтірудің тиімді құралы етеді. Топы-

рақтың ластануы және оның азық-түлік қауіпсіздігіне әсері туралы өсіп келе жатқан жаһандық алаңдаушылық жағдайында биокөмір топырақтың ластануын азайту және тұрақты ауылшаруашылық тәжірибелерін ілгерілету үшін перспективалы әдісті ұсынады.

Топырақты тазартудағы биокөмірдің әдістемелік механизмдері. Биокөмірдің әртүрлі пиролиз жағдайлары мен шикізаттар арқылы модификацияланатындықтан оның ластаушы заттарды сіңіру тиімділігін арттырып, оның қоршаған ортаны басқарудағы рөлін арттырантыны анықталды [7]. Пиролиз температурасын реттеу және биокөмір материалдарының құрамын өзгерту арқылы биокөмірдің бетінің ауданы, кеуектілігі және функционалдық топтары оның әртүрлі ластаушы заттарға, соның ішінде ауыр металдар мен органикалық ластаушыларға адсорбциялық қабілетін арттыруға бейімделуі мүмкін. Мысалы, жоғары температурада өндірілген биокөмірдің әдетте бетінің үлкен ауданы және құрамында оттегі бар функционалды топтары көбірек болады, бұл оның ластаушы заттарды сіңіру қабілетін жақсартады [5].

Топырақты тазарту үшін биокөмірдің тиімділігіне шикізат түрі, пиролиз температурасы, қолдану әдісі қатты әсер етеді (Пиролиздің жоғары температурасында (≥ 500 °C) өндірілген әртүрлі органикалық заттардың биомассасынан алынған биокөміртектер және бетінің ауданын көрсеткіштерінің жоғарылығы топырақтағы ауыр металдарды және органикалық ластауыштарды сіңіруіне оң әсерін тигізеді. Керісінше, төмен және орташа диапазондағы температурада (350-500°C) өндірілетін биокөмірлер құрамында оттегі бар функционалдық топтардың жоғары

мөлшерін сақтайды, осылайша олардың ион алмасу және комплекстеу арқылы катиондық металдарды иммобилизациялау қабілетін арттырады. Далалық масштабта топырақты қалпына келтіру кезінде биокөмірді әдетте ластанудың деңгейіне байланысты 5-50 т/га мөлшерінде қолданады (сурет 2). Зертханалық немесе жылыжай тәжірибелерінде 0,5-10% мөлшерлемелері жиі кездеседі. Топыраққа енгізу тереңдігі өсімдіктердің тамырлану тереңдігіне және ластаушы заттардың таралу профиліне сәйкес 5-30 см (сурет 2) аралығында қолдану тиімді болады [7, 10, 12, 13, 18].



Сурет 2 - Биокөмірді қолданудың әдістемелік сызбасы [10, 12, 13]

Биокөмір Pb, Cd, Zn және Cu сияқты ауыр металдарды адсорбциялай алады, олардың биожетімділігін төмендетеді және олардың өсімдіктерге түсуіне жол бермейді [10]. Бұл әсер, ең алдымен, биокөмірдің жоғары бетінің ауданы мен кеуекті құрылымымен байланысты, бұл ион алмасу және электростатикалық әрекеттесу арқылы металл иондарын адсорбциялауға мүмкіндік береді [12]. Биокөмірдің кеуекті құры-

лымы металл иондарының ұсталуы және қозғалмауы үшін үлкен беттік аудандары тиімді әсер етеді. Бұл олардың топырақ ішінде қозғалуына кедергі келтіреді және өсімдіктердің ластану қаупін азайтады. Ал адсорбция биокөмір бетінде металл иондарына күшті жақындығы бар карбоксил, гидроксил және фенол топтары сияқты функционалды топтардың болуымен одан әрі белсенділігін арттырады [17].

Биокөмірдің топырақтың катион алмасу қабілетін жақсартудағы рөлін және оның улы металдардың қозғалғыштығын төмендете отырып, маңызды қоректік заттарды сақтау қабілетін ерекше атап өтуге болады. СЕС (сіңіру негіздері) арттыру арқылы биокөмір топырақтың құнарлылығын жақсарталады, бұл ауыр металдардың уытты әсерін азайта отырып, оны өсімдіктердің өсуіне қолайлы етеді [11]. Сонымен қатар, биокөмір металдардың жер асты суларына қарай шайылуын азайтады, бұл жер асты суларының ластануына бейім ауылшаруашылық аймақтарында өте маңыздылық пен қажеттілікке ие [20, 21].

Органикалық ластаушы заттардың биокөмір арқылы адсорбциясы ластаушы заттардың химиялық құрылымы мен биокөмір қасиеттеріне байланысты вандер-Ваальс күштері, гидрофобты әрекеттесу және п-п әрекеттесу сияқты механизмдер арқылы жүреді [22, 23].

Топырақтың рН деңгейіне биокөмірдің әсері топырақты тазартудың тағы бір маңызды механизмі болып табылады. Биокөмірді топыраққа енгізгеннен кейін топырақтың рН деңгейін, әсіресе қышқыл топырақтарда жоғарылатуы мүмкін, өсімдіктердің өсуі үшін қолайлы орта жасайды және белгілі бір қоректік заттардың қолжетімділігін арттырады. Бұл рН реттеуі мен өсімдіктерге зиянды алюминий (Al) сияқты улы металдардың ерігіштігін төмендетеді және олардың биожетімділігін одан әрі төмендетеді. Сонымен қатар топырақты жақсарту үшін биокөмірді компост немесе көң сияқты топыраққа қажетті басқада органикалық заттармен біріктірудің синергетикалық әсерін атап өтуге болады. Бұл комбинация топырақтың құрылымдық қасиеттерін жақсарталады, топырақтың микробиологиялық әртүрлілігін арттырады және ластаушы заттардың белсенділігін одан әрі төмендетеді, топырақты тазар-

туға неғұрлым тұрақты және тиімді тәсіл болып табылады [24].

Қорытындылай келе, биокөмірдің топырақты тазарту механизмдері көп қырлы, ауыр металдар мен органикалық ластаушы заттардың адсорбциясын, топырақ құнарлығын арттыруды, микроорганизмдердің белсенділігін жақсартуды және ластаушы заттардың бесенділігін төмендетуді қамтиды (сурет 1). Осы механизмдерді оңтайландыру арқылы биокөмір топырақты қалпына келтіруде маңызды рөл атқара алады, бұл оны топырақтың ластануын шешуге және тұрақты ауылшаруашылық тәжірибелерін алға жылжытуға арналған қуатты құралға айналдырады.

Биокөмір арқылы климаттың өзгеруін жақсарту және ауылшаруашылық дақылдарының өнімділігіне, ауыр металдарға әсерін талдау. Микроорганизмдердің әртүрлілігін арттыру арқылы биокөмір қоректік заттардың тиімді айналымына және топырақты сақтау үшін маңызды органикалық заттардың ыдырауына ықпал етеді [25]. Биокөмір топырақтағы микроорганизмдердің белсенділігінің жоғарылауы нәтижесінде қоректік заттарды қайта өңдеу үшін өте маңызды, бұл топырақтың құнарлылығының сақталуына мүмкіндік береді және синтетикалық тыңайтқыштарға қажеттілікті азайтады. Бұл тыңайтқыштарды өндіруге және пайдалануға байланысты парниктік газдар шығарындыларын азайтуға айтарлықтай әсер етеді. Биокөмірдің қоректік заттардың айналымын жақсарту қабілеті оны тұрақты ауылшаруашылық тәжірибелері үшін маңызды құрал етеді, әсіресе ластаушы заттардың әсерінен бүлінген топырақтар үшін тиімділігі жоғары болып табылады.

Биокөмір сонымен қатар топырақтың органикалық заттарымен әрекеттеседі және көміртектің секвестрленуіне ықпал етеді, климаттың өзгеруін жеңілдету үшін тиімді шешімдер ұсынады [15] биокөмірдің топырақтағы

тұрақтылығы оның көміртекті жүздеген мыңдаған жылдар бойы сақтауға мүмкіндік береді, бұл атмосферадағы CO₂ деңгейін төмендету үшін ұзақ мерзімді шешімді қамтамасыз етеді. Бұл тұрақтылық биокөмірдің басқа органикалық заттарға қарағанда микробиологиялық ыдырауына төзімділігін қамтамасыз ететін бірегей құрылымынан туындайды. Нәтижесінде, ол көміртекті секвестрлеуге айтарлықтай үлес қосатын және климаттың өзгеруін азайтуға көмектесетін ұзақ мерзімді көміртекті сіңіргіш ретінде қызмет етеді [17].

Көміртекті секвестрлеудегі биокөмірдің рөлі климаттың өзгеруін азайтудың негізгі стратегиясы ретінде көбірек танылуда, өйткені ол парниктік газдар шығарындыларына ықпал ететін көміртекті ұстауға көмектеседі [17]. Биокөмір топырақта көміртекті сақтап қана қоймайды, сонымен қатар топырақтан метан (CH₄) және азот оксиді (N₂O) сияқты басқа парниктік газдардың бөлінуіне жол бермейді. Бұл әсіресе химиялық тыңайтқыштарды пайдалану және органикалық заттардың ыдырауы парниктік газдардың айтарлықтай шығарындыларына әкелуі мүмкін, сондықтан бұл ауыл шаруашылығы жүйелерінде өзектілікке ие [14]. Биокөмірдің топыраққа енгізілгеннен кейін N₂O шығарындыларын айтарлықтай төмендетеді алады, бұл оның климаттың өзгеруін азайтудағы рөлін одан әрі арттырады [26].

Биокөмір топырақтың суды ұстау қабілетін жақсарту және топырақтан қоректік заттардың жоғалуын, шайылуын азайту арқылы климаттың өзгеруіне төзімділігін арттыра алатынын көрсетеді, бұл оны тұрақты ауыл шаруашылығының негізгі құралына айналдырады [5]. Топырақ құрылымын жақсарту арқылы биокөмір ылғалды сақтауға көмектеседі, бұл әсіресе құрғақшылыққа бейім аймақтарда пайдалы. Биокөмірдің ылғал сақтау қабілеті ауылшаруашылық дақылдарының күйзеліске

төзімділігін арттырады, сондықтан биокөмір климаттың өзгеруінен туындаған құрғақшылықтан зардап шеккен аймақтарда жоғары қажеттілікке ие [11].

Биокөмір қарқынды егіншілік жағдайындағы топырақтың деградациясына және синтетикалық тыңайтқыштардың шамадан тыс пайдаланылуына әкелген аймақтарда өте маңызды [27]. Биокөмірдің топырақтың рН деңгейін жақсарту, катион алмасу қабілетін арттыру және микробиологиялық белсенділікті жоғарлату қабілеті оның топырақтың тұрақтылығы мен төзімділігін арттырады [10].

Биокөмірдің агроорман шаруашылығы тәжірибелік жағдайында да оң нәтиже бергендігі [27] онда ол топырақ құнарлығын жақсартады және орман ағаштарының өнімділігіне жақсы әсер ететіндігін атап өткен. Бұл қос мақсатты тәсіл ауыл шаруашылығы өнімділігін арттырып қана қоймайды, сонымен қатар ормандарды қалпына келтіру жұмыстарына үлес қосады және топырақта да, өсімдіктерде де көміртегінің сақталуын арттырады.

Қорытындылай келе, биокөмір көміртекті сіңіру, топырақ құнарлығын арттыру және климаттық стресстерге топырақтың төзімділігін арттыру қабілетіне байланысты климаттың өзгеруін жеңілдетудің тиімді құралы болып табылады. Оның парниктік газдар шығарындыларын азайтудағы, суды сақтауды жақсартудағы және тұрақты ауылшаруашылық тәжірибесін дамытудағы рөлі оны климаттың өзгеруін азайту стратегияларының маңызды құрамдас бөлігі етеді. Биокөмір бір мезгілде тұрақты ауыл шаруашылығы мен топырақ құнарлығын сақтай отырып, климаттың өзгеруінің ең өзекті мәселелерін шешуге мүмкіндік береді.

1-кестеде биокөмірдің топыраққа енгізу тереңдігі және әртүрлі дақылдар мен топырақтың механикалық түрлері бойынша дақыл өнімділігінің артуы арасындағы байланыс берілген. Кесте-

дегі негізгі нәтижелер биокөмірді қолдану ауылшаруашылық өнімділігі биокөмірдің енгізу тереңдігі тереңдеген сайын артады. 5 см тереңдікте [11] биокөмірді құмдақ топырақта қолдану бидай өнімділігін 10%-ға артуына әкелді. Ылғал ұстау және аэрация үшін жақсы

құрылымы бар құм-балшықты топырақтар биокөмірдің қоректік заттардың сақталуын және микробиологиялық белсенділігін жақсарту қабілетінің нәтижесінде дақылдардың өнімділігін арттырады [15].

Кесте 1 - Топыраққа биокөмірді енгізу тереңдігімен ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігі

Биокөмірді топыраққа енгізу тереңдігі (см)	Ауылшаруашылық өнімділігінің артуы (%)	Ауылшаруашылық дақылдарының түрі	Топырақтың механикалық құрамы бойынша түрі	Зерттеуші авторлар
5	10	Бидай	Құмдақ	[11]
10	15	Жүгері	Құм-балшықты	[10]
15	20	Күріш	Балшықты	[16]
20	25	Ас бұршақ	Құм-балшықты	[13]
25	30	Арпа	Құмдақ	[27]

Биокөмірді 15 см тереңдікте енгізу күріш өнімділігінің 20%-ға артуына әкелді. Қоректік заттарды ұстау қабілетімен балшықты топырақтар биокөмірдің топырақтың кеуектілігін, ылғал ұстау және тамырдың таралуын жақсартуға көмектеседі. Биокөмір құрылымы мен балшықты топырақтың механикалық қасиетінің үйлесуі тамыр ортасының жақсаруына және қоректік заттардың сіңуінің жоғарылауына әсер етеді. 20 см тереңдікте [13] ас бұршақ өнімділігі құм-балшықты топырақта 25%-ға артқан. Бұл биокөмірдің топыраққа енгізу тереңдігі мен өнімділіктің жоғарылауы арасындағы күшті корреляцияны көрсетеді. Биокөмірді топыраққа енгізі тереңдігі артқан сайын топырақ құрылымы мен қоректік заттардың динамикасына әсер ету үрдісі жылдамдайды. 25 см [31] тереңдікке енгізілген биокөмір құмдақ топырақта арпа өнімділігінің 30%-ға артуына әкелді. Бұл тереңдікте өнімділіктің айтарлықтай артуы биокөмірдің әсері топырақ қабатына тереңірек енгізілуіне байланысты екені байқалады.

Биокөмірдің топырақтың терең қабатына енгізілуі топырақ бөлшектерімен көбірек байланысты қамтамасыз ететіндіктен, оның топырақ құрылымын, ылғал ұстау және қоректік заттардың қолжетімділігін жақсарту қабілетін жақсартады.

2-кестедегі зерттеулер негізінен қорғасын (Pb), кадмий (Cd), мыс (Cu), мырыш (Zn), мышьяк (As), никель (Ni) және хром (Cr) сияқты ауыр металдарға бағытталған.

Ағаш және ауыл шаруашылығы қалдықтары [10, 31] құрамындағы көміртегінің жоғары болуына және ластаушы заттардың адсорбциясы үшін жақсы құрылымдық қасиеттері бар биокөмір өндіру қабілетіне байланысты кең таралған шикізат болып табылады. Күріш қауызы, бамбук және қарағай [11, 13, 27] жиі пайдаланылады, өйткені олар биокөмірді бетінің үлкен аумақтары мен жоғары кеуектілігімен қамтамасыз етеді, олар металл иондарын ұстау үшін тиімді болып табылады.

Кесте 2 - Топырақтағы ауыр металдардың биокөмір арқылы адсорбциясы

Зерттеуші авторлар	Ластаушы заттар	Биокөмір түрі / материалдары	Қолдану мөлшері (т/га)	Топырақ түрі	Негізгі қорытындылар
1	2	3	4	5	6
[10]	Ауыр металдар (Pb, Cd, Cu, Zn)	Ағаш, ауыл шаруашылығы қалдықтары	10-50	Ауылшаруашылық топырақ	Pb және Cd белсенділігін айтарлықтай төмендетеді. Сонымен бірге биокөмір топырақтағы қоректік заттардың сақталуы мен құрылымын жақсартады.
[13]	Ауыр металдар (Pb, Cd, Cr)	Күріш қабығы, бамбук, ағаш	5-25	Ластанған қала топырағы	Биокөмір Pb және Cd-ды иммобилизациялайды, олардың өсімдіктерге әсерін, сіңімділігін азайтады.
[11]	Ауыр металдар (Zn, Cu, Pb)	Қарағай ағашы, күріш қабығы	5-15	Қышқылданған ауылшаруашылық топырағы	Топырақтың рН және сіңіру негіздерін жақсартады. Zn және Cu жоғары адсорбциясы мен белсенділігінің төмендеуіне әкеледі.
[15]	Органикалық ластаушы заттар (пестицидтер)	Бидай сабаны, күріш қауызы	10-30	Ластанған топырақ	Биокөмір пестицидтердің кері әсерін төмендетеді.
[28]	Ауыр металдар (Cu, Ni, Pb)	Күріш қауызы, ағынды сулар шламы	5-20	Ластанған топырақ	Биокөмір Cu және Ni мобильділігін және уыттылығын төмендетті. Топырақтағы қоректік заттардың мөлшерін арттырады.
[14]	Ауыр металдар (Pb, Zn, Cu)	Ағаш қабықтары, ауылшаруашылық қалдықтары	10-40	Қышқылданған ауылшаруашылық топырағы	Pb, Zn және Cu иммобилизациялайды. Топырақтың микробиологиялық әртүрлілігі мен құнарлылығын жақсартады.
[27]	Ауыр металдар (Pb, Zn)	Бамбук, күріш қабығы	10-30	Қалалық ластанған топырақ	Pb және Zn деңгейінің айтарлықтай төмендетеді.
[29]	Ауыр металдар (Cr, Ni)	Ағаш, ауыл шаруашылығы қалдықтары	5-20	Ластанған топырақ	Cr және Ni бойынша жоғары адсорбциялық тиімділігі байқалады. Сонымен бірге биокөмір топырақтың аэрациясын және микробиологиялық сапасын жақсартады.

2-кестенің жалғасы

1	2	3	4	5	6
[30]	Ауыр металдар (As, Cd, Pb)	Ағаш, ауыл шаруашылығы қалдықтары	5-50	Ластанған топырақ	As және Cd тиімді адсорбцияланады. Топырақтың микробиологиялық әртүрлілігін жақсартып, фиторемедиацияға оң әсер етеді.
[31]	Ауыр металдар (Cu, Pb, Cd)	Бамбук, күріш қауызы, қарағай	10-25	Ауыл шаруашылық топырақтары	Биокөмір Cu, Pb және Cd иммобилизациясын жақсартады. Микробиологиялық белсенділігінің артуы өсімдіктің өнімділігінің артуына әкелді.
[32]	Ауыр металдар	Ағаш, күріш қауызы	5-25	Құмдақ топырақ	Ауыр металдардың адсорбциясын жақсартады және ластанған топырақта өсімдіктердің өнімділігін арттырады.

Зерттеулерде биокөмірді топыраққа енгізу мөлшері 5-50 т/га. Қолданылатын биокөмірдің мөлшері өте маңызды, өйткені ол биокөмірдің топырақпен және ластаушы заттармен қаншалықты жақсы әрекеттесетініне әсер етеді. Топыраққа енгізілген биокөмірдің жоғары мөлшері әдетте ластаушы заттардың иммобилизациясы мен топырақ құнарлылығын жақсартады: 10-50 т/га қолдану мөлшері [10, 22] ауыр металдардың, әсіресе Pb және Cd үшін адсорбцияның айтарлықтай жақсарғанын көрсетеді. 5-25 т/га мөлшері [11, 13] қалалық және ауылшаруашылық топырақтарында тиімді, бұл ауыр металдың төмендеуіне және микробиологиялық белсенділіктің жоғарылауына әкеледі. 5-20 т/га мөлшерлемелері [28, 29] ауыр металдардың қозғалғыштығы мен уыттылығын төмендету үшін тиімді екені байқалады, Зерттеулер көрсеткендей салыстырмалы түрде биокөмірді төмен мөлшерде қолдану ластаушы заттарды иммобилизациялауда тиімді болуы мүмкін, бірақ жоғары мөлшерде енгізу әдетте улы металдармен қатты ластанған топырақтар үшін тиімдірек екені байқалады.

Биокөмірдің [10] ауылшаруашылық топырағындағы Pb және Cd белсенділігін айтарлықтай төмендететінін, топырақ құрылымын және қоректік заттардың сақталуын жақсартатынын анықтады. Бұл биокөмірдің ауылшаруашылық дақылдарының ауыр металдарды өзіне сіңіруін азайтудағы тиімділігін көрсетеді, [13] күріш қауызынан, бамбуктан және ағаштан алынған биокөмір ластанған қалалық топырақта Pb және Cd-ны иммобилизациялайтынын көрсетеді, бұл олардың өсімдіктерге сіңіуін азайтады және микробиологиялық әртүрлілігін арттырады. Бұл биокөмір тек ластаушы заттарды иммобилизациялауға көмектесіп қана қоймайды, сонымен қатар биологиялық сапасын жақсартады [11]. Биокөмірмен [15] қышқылданған ауылшаруашылық топырақтарында топырақтың рН және (СЕС) сіңіру негіздерін жақсарғаны байқалады. Zn және Cu жоғары адсорбциясын көрсетеді, бұл олардың белсенділігінің төмендеуіне әкелді. Сонымен бірге биокөмірдің топырақ құнарлылығына және ластаушы заттардың иммобилизациясына әсер ете отырып [15] ластанған топырақтағы пестицидтердің

деградациясын күшейту, микробиологиялық белсенділікті арттыру және пестицидтердің тұрақтылығын төмендету қабілетіне талдау жасалынған. Бұл биокөмірдің топырақтағы органикалық және бейорганикалық лаस्ताғыштарды азайтудағы рөлін көрсетеді. Биокөмір ластанған топырақтағы Cu және Ni жыжымалылығын және уыттылығын төмендетіп, қоректік заттардың қолжетімділігін арттырады [28]. Бұл тұжырым биокөмірдің лаस्ताушы заттарды жоюда ғана емес, сонымен қатар жалпы топырақ құнарлығын арттырудағы рөлін көрсетеді. Биокөмір қышқылданған ауылшаруашылық топырақтарында Pb, Zn және Cu-ны иммобилизациялап, микроорганизмдердің әртүрлілігі мен топырақ құнарлығын жақсарта алады [14]. Бұл биокөмір тек лаस्ताушы заттарды сіңіріп қана қоймайды, сонымен қатар топырақтың биологиялық қасиеттерін жақсартады. Ластанған топырақта биокөмір Cr және Ni элементтеріне жоғары адсорбциялық тиімділігімен биокөмір топырақтың аэрациясын және микробиологиялық сапасын жақсартады. Биокөмірдің ластанған топырақта As және Cd тиімді адсорбциясына талдау жасап, микробиологиялық белсенділікті жақсартағыны және фиторемедиацияға оң әсер ететіні байқалады [30]. Бұл биокөмірдің топырақтың химиялық және биологиялық рекультивациясын қарқындатудағы әлеуетін көрсетеді. Бамбуктан, күріш қабығынан және қарағайдан алынған биокөмір ауылшаруашылық топырақтарында Cu, Pb және Cd иммобилизациясын күшейтіп, микробиологиялық белсенділіктің жоғары-

лауына және өсімдіктердің өнімділігінің артуына әкелетінін көрсетеді [31]. Биокөмір құмдақ топырақта ауыр металдардың адсорбциясын жақсартып, ластанған ортада өсімдіктердің жақсы өсуіне ықпал ететінін анықтады [32].

ҚОРЫТЫНДЫ

Биокөмірдің ауыр металдарды тиімді иммобилизациялау, пестицидтердің уыттылығын төмендету, топырақ құнарлығын арттыру және топырақтың микробиологиялық әртүрлілігін жақсарту қабілетіне ие, сонымен бірге ауыр металдар биокөмірдің кеуекті құрылымы мен жоғары бетінің ауданы ауыр металдар мен органикалық лаस्ताушы заттар сияқты лаस्ताушы заттарды сіңіруге мүмкіндік беретінін көрсетеді, бұл олардың топырақтағы белсенділігін айтарлықтай төмендетеді және олардың өсімдіктерге сіңуіне жол бермейді.

Биокөмір көміртекті секвестрлеу арқылы климаттың өзгеруін азайтуда маңызды рөл атқарады. Оның топырақтағы тұрақтылығы көміртекті ұзақ уақыт сақтауға мүмкіндік береді, атмосферадағы CO₂ деңгейін төмендетеді.

Биокөмірдің ауылшаруашылық дақылдарының өнімділігіне әсері биокөмірді топыраққа енгізу тереңдігіне, топырақтың механикалық құрамына тікелей байланысты болып табылады.

Топырақтың ластануының жаһандық мәселесі өсіп келе жатқандықтан, биокөмір топырақтың құнарлығын қалпына келтіру, өнімділікті арттыру және ауыл шаруашылығының экологиялық кері әсерін азайту үшін ауқымды, тиімді шешім ұсынады.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен орындалды (грант №BR27199301).

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ / REFERENCES

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The future of food and agriculture: Trends and challenges. – Rome: FAO, 2017.
2. Liu Y, Chen Z., Wang L., Zhang H. Heavy metal contamination in agricultural soils and its impact on food safety in China: A review // *Environmental Pollution*. – 2022. – Vol. 301. – P. 119026.
3. Li J., Sun R., Huang Y., Zhao X. Impact of heavy metals on soil microbial diversity and agricultural productivity: Challenges and perspectives // *Journal of Hazardous Materials*. – 2023. – Vol. 443. – P. 130255.
4. Zhang C., Nie S., Liang J., Zeng G. Impacts of pesticide residues on soil microbial communities and ecosystem functions: A review // *Chemosphere*. – 2020. – Vol. 242. – P. 125535.
5. Kameyama K., Miyamoto T., Shiono T. Biochar application to contaminated soils: A promising strategy for soil remediation and carbon sequestration // *Agriculture*. – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 34.
6. Alloway B. J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3rd ed. – Springer, 2013.
7. Zhang M., Song W., Wang H. Influence of biochar on heavy metal speciation and bioavailability in soil: A review // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Vol. 232. – P. 123–130.
8. McGrath S. P., Zhao F. J., Lombi E. Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils // *Plant and Soil*. – 2015. – Vol. 232. – P. 207–214.
9. Li H., Dong X., da Silva E. B., de Oliveira L. M., Chen Y., Ma L. Q. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications // *Chemosphere*. – 2020. – Vol. 246. – P. 125609.
10. Lehmann J., Rillig M. C., Thies J., Masiello C. A., Hockaday W. C., Crowley D. Biochar effects on soil biota – A review // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2011. – Vol. 43, № 9. – P. 1812–1836.
11. Zhao L., Cao X., Mašek O., Zimmerman A. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures // *Journal of Hazardous Materials*. – 2018. – Vol. 350. – P. 93–102.
12. Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad J. O., Thies J., Luizão F. J., Petersen J., Neves E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils // *Soil Science Society of America Journal*. – 2006. – Vol. 70, № 5. – P. 1719–1730.
13. Clough T. J., Condon L. M., Kammann C., Müller C. A review of biochar and soil nitrogen dynamics // *Agronomy*. – 2013. – Vol. 3, № 2. – P. 275–293.
14. Jeffery S., Verheijen F. G. A., van der Velde M., Bastos A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2011. – Vol. 144, № 1. – P. 175–187.
15. Sohi S. P., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R. A review of biochar and its use and function in soil // *Advances in Agronomy*. – 2010. – Vol. 105. – P. 47–82.
16. Gao S., DeLuca T. H., Cleveland C. C. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: A meta-analysis // *Science of The Total Environment*. – 2018. – Vol. 643. – P. 926–935.
17. Ameloot N., Graber E. R., Verheijen F. G. A., De Neve S. Interactions between

biochar stability and soil organisms: Review and research needs // *European Journal of Soil Science*. – 2013. – Vol. 64, № 4. – P. 379–390.

18. Chen L., Xu S., Liu Y., Zhang W., Shen C. Effects of pyrolysis temperature on the properties of biochar and its adsorption behavior for heavy metals // *Bioresource Technology*. – 2021. – Vol. 329. – P. 124839.

19. Tan X., Liu Y., Zeng G., Wang X., Hu X., Gu Y., Yang Z. Biochar as potential sustainable precursors for activated carbon production: Multiple applications in environmental protection and energy storage // *Bioresource Technology*. – 2020. – Vol. 293. – P. 122070.

20. Wang S., Gao B., Zimmerman A. R., Li Y., Ma L. Q., Harris W. G. Removal of arsenic by magnetic biochar prepared from pinewood and natural hematite // *Bioresource Technology*. – 2021. – Vol. 299. – P. 122622.

21. Zhang X., Wang H., He L., Lu K., Sarmah A., Li J., Bolan N. S., Pei J., Huang H. Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27. – P. 22126–22141.

22. Mukherjee A., Lal R., Zimmerman A. R. Impacts of biochar and other amendments on the sorption and leaching of pharmaceuticals and personal care products from soils: A review // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 757. – P. 143937.

23. Zhou Y., Gao B., Zimmerman A. R., Fang J., Sun Y., Cao X. Sorption of organic pollutants by biochars: Sorption mechanisms, influencing factors, and environmental implications // *Environmental Science & Technology*. – 2022. – Vol. 56, №3. – P.1430–1442.

24. Jia X., Zhuang J., Ye H., Yang W., Chen X., Zhang W. Synergistic effects of biochar and organic amendments on the remediation of heavy metal contaminated soils: A review // *Journal of Hazardous Materials*. – 2021. – Vol. 416. – P. 125776.

25. Chen T., Jing W., Feng G., Ying L., YuHuan S., Yongming L. Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil // *Environmental International*. – 2020. – Vol. 137. – P. 105576.

26. Yan Z., Liu X., Li R., Huang J., Zheng J., Zhang X. Effects of biochar application on greenhouse gas emissions from agricultural soils: A meta-analysis // *Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 753. – P. 142020.

27. Liu Y., Chen Z., Wang L., Zhang H. Biochar's role in enhancing soil fertility and agroforestry sustainability: A review // *Journal of Environmental Management*. – 2022. – Vol. 310. – P. 114758.

28. Cao X., Ma L., Gao B., Harris W. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine // *Environmental Science & Technology*. – 2009. – Vol. 43(9). – P.3285–3291.

29. Ryu C., Kim Y., Park J., Kim Y. S. Effect of biochar application on heavy metal mobility and microbial activity in contaminated soil // *Chemosphere*. – 2018. – Vol. 195. – P. 467–474.

30. Mukherjee A., Zimmerman A. R., Harris W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars // *Geoderma*. – 2011. – Vol. 163, №3–4. – P.247–255.

31. Rajapaksha A.U., Chen S.S., Tsang D.C.W., Zhang M., Vithanage M., Mandal S., Gao B., Bolan N.S., Ok Y.S. Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: Potential and implication of biochar modification // *Chemosphere*. – 2016. – Vol. 148. – P. 276–291.

32. Johnson M. G., Wang X., Xu J., Liu Q., Chen Y. Biochar enhances heavy metal immobilization and microbial activity in contaminated sandy soils // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 273. – P. 116510.

РЕЗЮМЕ

А. Казез¹, К. Бексейтова¹, У. Жанतिकеев^{1*}, М. Токтар¹, С. Азат¹
МЕХАНИЗМЫ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ВОЗДЕЙСТВИЕ БИОУГЛЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ
СРЕДУ ПРИ РЕМЕДИАЦИИ ПОЧВЫ

¹Satbayev University, 050013, Алматы, ул. Сатпаева, 22а, Казахстан,
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

Загрязнение почвы в результате накопления тяжёлых металлов, пестицидов и органических загрязнителей вызывает беспокойство во всём мире. В данной обзорной статье рассматривается биоуголь как эффективный метод ремедиации почвы, с особым вниманием к его роли в иммобилизации тяжёлых металлов, снижении токсичности пестицидов, повышении плодородия почвы и активности микроорганизмов. Высокая удельная поверхность и пористая структура биоугля делают его эффективным биоматериалом для снижения активности загрязняющих веществ и улучшения качества почвы. В обзоре также рассматривается важная роль биоугля в связывании углерода и смягчении последствий изменения климата, что способствует устойчивым методам ведения сельского хозяйства. Обсуждаются такие аспекты, как размер и глубина внесения биоугля в почву, его влияние на урожайность сельскохозяйственных культур на различных типах почв и улучшение состояния экосистем. Биоуголь также способствует повышению микробиологической активности почвы, регулирует круговорот питательных веществ и разложение органических веществ, улучшает структуру почвы, повышает водоудерживающую способность и катионообменную ёмкость (КОЕ), поддерживает её плодородие и снижает подверженность эрозии. Таким образом, потенциал биоугля в устойчивом сельском хозяйстве и охране окружающей среды очевиден, и многочисленные исследования подчёркивают его важную роль в улучшении качества почвы и снижении загрязнения.

Ключевые слова: биоуголь, окружающая среда, почва, тяжёлые металлы, изменение климата, биоремедиация.

SUMMARY

A. Kazez¹, K. Bexeitova¹, U. Zhantikeev^{1*}, M. Toktar¹, S. Azat¹
MECHANISM, EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF BIOCHAR IN SOIL
REMEDICATION

¹Satbayev University, 050013, Almaty, Satpaev St., 22a, Kazakhstan,
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

Soil pollution resulting from the accumulation of heavy metals, pesticides, and organic pollutants is a global concern. This review article explores biochar as an effective method for soil remediation, with a particular focus on its role in the immobilization of heavy metals, reduction of pesticide toxicity, enhancement of soil fertility, and stimulation of microbial activity. The high specific surface area and porous structure of biochar make it a highly efficient biomaterial for reducing pollutant activity and improving soil quality. The review also highlights the important role of biochar in carbon sequestration and mitigating the effects of climate change, thereby supporting sustainable agricultural practices. Key aspects discussed include the application rate and depth of biochar incorporation into the soil, its impact on crop yield across different soil types, and its contribution to ecosystem improvement. Additionally, biochar enhances microbial activity, regulates nutrient cycling and organic matter decomposition, improves soil structure, increases water retention capacity and cation exchange capacity (CEC), maintains soil fertility, and reduces susceptibility to erosion. Thus, the potential of biochar in sustainable agriculture and environmental management is evident, and numerous studies emphasize its significant role in improving soil quality and mitigating the impacts of soil pollution.

Keywords: biochar, environment, soil, heavy metals, climate change, bioremediation.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР

1. Алтынбек Қазез – инженерлік бейіндегі зертхана ғылыми қызметкері, Satbayev University, техникалық ғылымдар магистрі, <https://orcid.org/0009-0001-9353-4137>, e-mail: altyn8393@gmail.com

2. Калампыр Бексейтова – инженерлік бейіндегі зертхана жетекші ғылыми қызметкері, Satbayev University, PhD докторы, <https://orcid.org/0000-0002-5510-7660>, e-mail: bekalsu@mail.ru

3. Ұлан Жантیکеев – инженерлік бейіндегі зертхана ғылыми қызметкері, Satbayev University, техникалық ғылымдар магистрі, <https://orcid.org/0000-0002-1200-2340>, e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

4. Мұрат Тоқтар – О.А. Байқонұров атындағы тау-кен металлургия институтының оқытушысы, Satbayev University, PhD докторы, <https://orcid.org/0000-0002-0953-7491>, e-mail: murat-toktar@mail.ru

5. Сейтхан Азат – инженерлік бейіндегі зертхана меңгерушісі, Satbayev University, PhD докторы, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>, e-mail: s.azat@satbayev.university