





Еуразиялық агротехникалық журнал = Евразийский агротехнический журнал. – Астана: С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, 2026. -№ 1 (129). - P.-198-212. - ISSN 3135-243X, 3135-2448

doi.org/10.51452/eaj.2026.1(129).2134

ӘОЖ 631.44:662.636:632.125(045)

Шолу мақаласы

Экологиялық деградацияға ұшыраған тұзданған және органикалық ластанған топырақты қалпына келтірудегі биокөмірдің рөлі

Қазез А.¹ , Бексейтова К.¹ , Жаппарова А.А.² , Кенжегулова С.О.³ , Тоқтар М.¹ ,
Азат С.¹ 

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

³С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан

Корреспондент-автор: Кенжегулова С.О.: saya_keng@mail.ru

Бірлескен авторлар: (1: АК) altyn8393@gmail.com; (2: КВ) bekalsu@mail.ru

(3: АZh) aigul7171@inbox.ru; (4: МТ) murat-toktar@mail.ru; (5: СА) s.azat@satbayev.university

Қабылданған күні: 29.01.2026 **Қабылданды:** 18.02.2026 **Жарияланды:** 30.03.2026

Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Бұл шолу мақалада биокөмірдің тұзданған, кебірленген және органикалық ластанған топырақтардың физикалық-химиялық және биологиялық қасиеттеріне әсері мен дақылдардың өнімділігін арттырудағы рөлін қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – биокөмірді қолдану арқылы топырақ қасиеттерін жақсарту, ластаушы заттардың бейтараптандырылуын арттыру және ауыл шаруашылығы өнімділігін жоғарлату жолдарын анықтау.

Материалдар мен әдістер. Шолу материалдары негізінде биокөмірдің әртүрлі шикізат түрлері (ағаш, лигноцеллюлоза, көң), оларды 450-600 °С температурада пиролиздеу жағдайлары және кейбір үлгілерді Fe немесе O/N қоспаларымен функционалдандыру әдістері бойынша салыстырмалы талдау жүргізілді. Сонымен қатар, биокөмірді топыраққа енгізу мөлшері (1–40 т/га) және оның топырақтың рН-ы, электр өткізгіштігі (ЕСе), натрий индекстері (SAR, ESP), су ұстау қабілеті (WHC), катион алмасу сыйымдылығы (СЕС), органикалық көміртегі (SOC), ластаушы заттарды жою тиімділігі мен дақыл өнімділігіне әсері бағаланады.

Нәтижелер. Биокөмір тұзданған топырақта электрлік өткізгіштікті (ЕСе) 7-30%-ға дейін төмендетіп, дақыл өнімділігін 20-32%-ға арттырғанын көрсетті. Кебір топырақта ESP 15-25%-ға, SAR шамамен 20%-ға төмендеді. Органикалық ластаушылар болған жағдайда РАН пен пестицидтерді жою тиімділігі 70-90%-ға жетіп, мұнай көмірсутектерінің мөлшері 30-70%-ға азайды. Биокөмір топырақ құрылымын жақсартып, микроорганизмдердің белсенділігін арттырды. Функцияландырылған үлгілердің сорбциялық және каталитикалық қасиеттері күшейді, ал қолдану мөлшері мен енгізу тереңдігі тиімділікті анықтайтын маңызды факторлар болды.

Қорытынды. Зерттеу нәтижелері биокөмір топырақты қалпына келтіруде көпфункционалды және тұрақты құрал екенін көрсетті. Ол тұздылық пен қышқылдықты реттеуге, органикалық ластаушыларды бейтараптандыруға және дақыл өнімділігін арттыруға ықпал етеді.

Нәтижелер. Биокөмірді стандартталған тәсілдермен қолданудың тиімділігін растап, тұрақты ауыл шаруашылығы мен экологиялық қалпына келтіруде маңызды рөл атқаратынын көрсетеді.

Кілт сөздер: биокөмір; тұздану; пестицидтер; мұнай көмірсутектері; ремедиация; топырақ.

Кіріспе

Тұздану мен органикалық ластанудан туындаған топырақтың деградациясы ХХІ ғасырдағы ең өзекті жаһандық экологиялық мәселелерінің біріне айналды. Топырақтың тұздануы – бұл ауыл шаруашылығы үшін өте қауіпті процесс, себебі ол топырақтың өнімділігін едәуір төмендетіп, жердің ұзақ мерзімді пайдалану қабілетін шектейді. Әлем бойынша топырақтың тұздануынан зардап шегетін аумақтар көп, және бұл мәселе әсіресе су тапшылығы және жоғары булану деңгейі бар аймақтарда айқын байқалады. FAO-ның бағалауы бойынша, дүние жүзінде бір млрд га астам жер суармалы егістік алқаптарының 20%-дан астамын құрайтын топырақ тұздануынан зардап шегеді [1]. Бұл көрсеткіш топырақтың құнарлылығын сақтап қалуға арналған әртүрлі шаралар мен әдістердің қажеттілігін айқындайды.

Тұзданудың негізгі себептері – суарудың дұрыс ұйымдастырылмауы, төмен су сапасы және жоғары булану. Бұл мәселе әсіресе Орталық Азия сияқты шөл және шөлейтті аймақтарда өте маңызды. Мысалы, Орталық Азияда тұздың жиналуын айтарлықтай тездететін су тапшылығы мен жоғары булану топырақ кескінінде тұздың жинақталуына әкеледі [2]. Қазақстанның оңтүстігінде және батысында, әсіресе Сырдария мен Әмудария бассейндерінде тұздану проблемасы кеңінен таралған. Суармалы егістік алқаптарының негізгі бөлігі бидай, мақта және күріш өсімдіктеріне арналған, ал бұл да тұздың топыраққа қосылуына ықпал етеді. Осы аймақтарда топырақтың екінші реттік тұздану үрдістері орын алып, бұл өнімнің айтарлықтай төмендеуіне әкеледі, себебі тұздың топыраққа жиналуы оның құрылымын бұзады, су және қоректік заттармен қамтамасыз ету процесін қиындатады.

Тұзданудың теріс әсерінен басқа, антропогендік ластану да топырақтың сапасына үлкен қауіп төндіреді. Өнеркәсіптің кеңеюі, әсіресе Қазақстанның Батыс өңірінде (Атырау, Маңғыстау) мұнайды барлау мен өндіру, сондай-ақ басқа да өнеркәсіптік қызметтердің әсері, топырақтың техногенді ластануына әкеліп соқтырды. Бұл аймақтарда мұнай көмірсутектерінің қалдықтары, полициклді хош иісті көмірсутектер және ауыр металдар топыраққа жиналады, бұл оның экологиялық жағдайын нашарлатады және ауыл шаруашылығы дақылдарының өсуіне теріс әсер етеді [3, 4]. Сонымен қатар, Жамбыл және Орталық Қазақстан өңірлеріндегі пестицидтерді шамадан тыс қолдану топырақтың химиялық құрамын бұзады, олар топырақтың микробиологиялық белсенділігін төмендетеді, бұл да өнімділікке теріс әсер етеді. Қазақстанның оңтүстік және шығыс өңірлерінде пестицидтердің көп қолданылуы экожүйеге ұзақ мерзімді әсер етуі мүмкін.

Осылайша, топырақтың тұздануы мен органикалық ластануы қазіргі уақытта ауыл шаруашылығына және экологияға зор зиян келтіріп отыр. Бұл мәселелердің шешімі жерді тиімді пайдалануды, су ресурстарын дұрыс басқаруды, химиялық тыңайтқыштар мен пестицидтерді қолдануды тәртіпке келтіру және экологиялық тұрғыдан таза әдістерді қолдану болып табылады.

Тұздану өсімдіктердің су мен қоректік заттарды сіңіруіне кедергі келтіретін осмостық кернеуді тудырып, электр өткізгіштігін (ЕСе) жоғарылату арқылы топырақтың қасиеттеріне әсер етеді. Натрийдің жоғары адсорбциялық коэффициенті (SAR) және алмасатын натрий пайызы (ESP) гранулометриялық құрамы құмбалшықты топырақтың минералдарын тұрақсыздандырады, топырақ агрегаттарын бұзады және гидравликалық өткізгіштікті төмендетеді, егістік өнімділігін одан әрі шектейді [5, 6]. Сонымен қатар, органикалық ластағыштар гидрофобтылығы мен микробтардың деградациясына төзімділігіне байланысты топырақта сақталады, топырақ құнарлылығына, азық-түлік қауіпсіздігіне және экожүйе тұрақтылығына ұзақ мерзімді қауіп төндіреді [7]. Топырақты өңдеу, химиялық тотығу немесе жуу сияқты дәстүрлі қалпына келтіру әдістері қымбат, энергияны көп қажет етеді және үлкен көлемдегі аумақтарда практикалық тұрғыдан тиімділігі төмен болып табылады.

Биокөмір – бұл өсімдік қалдықтары, көң немесе ағаш сияқты биомассаның пиролизі арқылы алынған көміртегіге бай органикалық өнім. Бұл материалдың ерекше қасиеттері оны тұрақты ауыл шаруашылығының маңызды құрамдас бөлігі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Биокөмірдің ең маңызды сипаттамаларының бірі – оның жоғары кеуектілігі мен үлкен бетінің ауданы. Сонымен қатар, оның құрамындағы функционалдық топтар оның көптеген пайдалы қасиеттерін іске асыруға мүмкіндік береді. Биокөмірдің бұл қасиеттері оны әртүрлі экологиялық процестерде қолдануға өте тиімді етеді. Ол топырақта тұз бен ластаушы заттарды

иммобилизациялау қабілетіне ие, сонымен бірге топырақтың рН буферін жақсартуға, топырақтағы органикалық заттардың құрамын арттыруға мүмкіндік береді [8, 9].

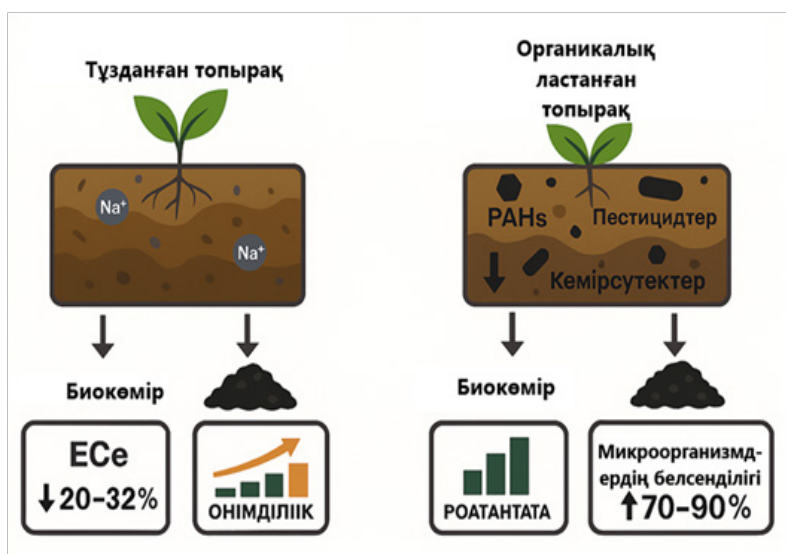
Биокөмірдің тұзданған топырақта ерекше әсері бар. Бұл жағдайда, биокөмір топырақтың электр өткізгіштігін (ЕСе) төмендетіп, оның өнімділігін едәуір жақсартады. Қышқыл топырақта Са/Mg бай биокөмірлер натрий иондарын алмастырып, топырақтың құрылымын қалпына келтіріп, инфильтрация процестерін жақсартады. Бұл, өз кезегінде, топырақтың су ұстау қабілетін жақсартуға және өнімділіктің өсуіне ықпал етеді [10]. Ластанған топырақта биокөмірдің көмегімен полициклді ароматты көмірсутектер (РАН), пестицидтер мен басқа да органикалық ластаушы заттар адсорбцияланады. Бұл биокөмірдің ластанған экожүйелерде шіру процесін ынталандырып, микроғзалардың ластанған заттарды бұзу қабілетін арттырады [11, 12].

Сонымен қатар, биокөмірдің әсері ғылыми зерттеулермен кеңінен расталған. Металдаулар нәтижесінде биокөмірдің ауыл шаруашылығында қолданылуы егін өнімділігін 20-32%-ға арттыратыны және топырақтың органикалық көміртегінің мөлшерін 50%-дан астамға жақсартатыны анықталды [13, 14]. Бұл көрсеткіштер оның топырақтың құнарлылығын арттыруда, суармалы жерлерде және басқа да агроэкологиялық жағдайларда маңызды рөл атқаратынын дәлелдейді.

Биокөмір тек экологиялық қалпына келтіру құралы ретінде ғана емес, сонымен бірге жерді тұрақты басқару және климаттық өзгерістерге қарсы күресте маңызды катализатор болып табылады. Ол топырақтың сапасын жақсарту, су мен тыңайтқыштарды үнемдеу, көміртегі мен басқа да ластаушы заттардың ауаға бөлінуін төмендету үшін негізгі құралдардың бірі болып табылады. Бұл табиғи ресурстарды тиімді пайдалануды қамтамасыз етеді, ауыл шаруашылығында тұрақты даму моделін енгізуге ықпал етеді және жер бетіндегі экологиялық теңдікті сақтауға үлкен үлес қосады.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу әдістері бойынша биокөмірдің топырақтың физика-химиялық немесе биологиялық қасиеттеріне әсері туралы ғылымдардың нақты тәжірибелік немесе далалық мәліметтерімен қамтамасыз ететін зерттеулері негізіндегі салыстырмалы талдау нәтижелерін қамтиды. Сол зерттеулердегі зертханалық, жылыжайлық және далалық тәжірибелер қарастырылды. Талданатын негізгі параметрлерге топырақтың рН, электр өткізгіштігі (ЕСе), натрийдің адсорбциялық коэффициенті (SAR), алмаспалы натрий пайызы (ESP), су ұстау қабілеті (WHC), катион алмасу қабілеті (CEC), топырақтың органикалық көміртегі (SOC), ластаушы заттарды азайту тиімділігі және дақылдардың өнімділігі бойынша талдау нәтижелері кіреді (1-сурет).



1-сурет – Биокөмірдің топырақты ремедиациялаудағы қасиеттері

Салыстырмалы нәтижелерде ластану кластары мен стресс факторларын, сандық талдау нәтижелерін, жобалау нұсқауларын, стандартталған нәтижелік көрсеткіштерін және нақты далалық зерттеу нәтижелерін қамтитын дәйекті дәлелдер талданған (1-5 кесте). Әдістемелік сәйкестікке, қолдану жылдамдығына, пиролиз шарттарына, шикізатты таңдауға, биокөмірді енгізу тереңдігіне және қосымша жақсарту әдістеріне (мысалы, гипс, компост немесе микроорганизмдер) назар аударылды. Бұл құрылымдық тәсіл әртүрлі эксперименттік қорытындыларды жаһандық және аймақтық контексттерге қолданылатын үйлесімді құрылымға біріктіруге мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

Биокөмірдің топырақтың тұз құрамына және мөлшеріне әсер етуі бойынша интерпретациялық тұжырымдамалық талдаулар келтірілген (1-кесте).

1-кесте – Ластану кластары, стресс факторлары және биокөмірдің қалпына келтіру механизмдері

Топырақтың ластану түрлері	Қолайсыз факторлар	Ластаушылардың доминант түрлері	Биокөмір қасиеттері	Биокөмірдің эксперименттік механизмдері	Дереккөздер
Тұзды топырақ	Жоғары ЕСе, осмостық кернеу	NaCl, Na ₂ SO ₄	Орташа сілтілік, кеуектілік, ОСК	Шаймалау, Na ⁺ алып тастау	[15]
Кебір топырақ	Жоғары ESP, SAR	NaHCO ₃ , Na ₂ CO ₃	Кальциймен байытылған органикалық материалдар	Na ⁺ алмасу, жинақтау	[5, 16]
Тұзды-сілтілі топырақ	Жоғары деңгейдегі тұздылық	Аралас тұз	Ағаш қабығы	pH буферлеу, Na ⁺ ығысу	[17]
Органикалық ластаушы заттар	Тұрақтылық, уыттылық	Полицикλικа лық хош иісті көмірсутектер, пестицидтер, ТРН (жалпы мұнай көмірсутектері)	Жоғары SSA, хош иісті биокөмір	Сорбция және микробты ынталандыру	[18, 19]

Ластанған және тұзданған топырақты жақсартуда нәтижелі эксперименттік зерттеулерде оның ішінде топырақтың ластану кластары, стресс факторлары және биокөмірдің қалпына келтіру механизмдері бойынша топырақ контекстіне байланысты әртүрлі механизмдерді көрсетеді (1-кесте). Тұзды топырақта шамадан тыс Na⁺ және Cl⁻ иондарын буферлеу арқылы осмостық кернеуді азайтады, олардың биожетімділігін төмендетеді. Кебір топырақта Ca/Mg бай биокөмірлер иондардың алмасуында Na⁺ алмастыруға көмектеседі, топырақ құрылымы мен өткізгіштігін арттырады. Органикалық ластаушылар үшін биокөмір екі жақты рөл атқарады: оның үлкен бетінің ауданына байланысты физикалық адсорбция және (π-π) топырақта органикалық заттар мен химиялық элементтердің адсорбциясы күшейеді. Сонымен қатар, биокөмір көбінесе микроорганизмдердің белсенділігін арттырады, осылайша ластаушы заттардың биодеградациясын тездетеді. Бұл синергиялық әсерлер биокөмірді топырақты жақсартуға қажетті қосымша мелиорант және биотыңайтқыштарды енгізу, әсіресе гипс, компост немесе микробтық егу оң нәтиже беретіндігін байқауға болады.

2-кесте – Биокөмірдің өнімділікке әсері бойынша нәтижелер

Топырақтың ластану түрі	Интервенция	Нәтижелер	Әсермөлшері	Қосымша жақсарту	Жүйелік талдаулар	Дерек көздер
Тұзданған	Ағаш қабығы, 10-30 т/га	ЕСе↓, өнімділік↑	ЕСе ↓7-30%; кірістілік +20–32%	Шаю, тыңайтқыш	Бидай, күріш, жүгері	[15, 17]
Кебірленген	Са/Mg бай биокөмірлер	ESP↓, SAR↓	ESP ↓15-25%; SAR ↓20%	Гипс	Күріш, арпа	[5, 16]
РАНs (Полицикликалық хош иісті көмірсутектер)	Тотыққан көмір, 1–5%	ΣРАН↓, жартылай шығарылу кезеңі↓	50-90% жою	Микробтар	Топырақ/зертхана	[19]
Пестицидтер	Fe-түрлендірілген белгілер	Адсорбция↑	Жою >90%	Компост	Атразинді топырақ	[18, 20]
Мұнай НС (гидрокөмірсутектері)	Кеуекті таңбалар, 1-5%	ТРН↓, микротық↑	30-70% жою	Қоректік заттар	Мұнай кен орындары, зертхана	[21]

Биокөмірдің ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігіне әсері бойынша нәтижелер бойынша сандық мәліметтер биокөмірдің топырақ жағдайын айтарлықтай жақсартатынын растайды (2-кесте). Тұздылық үшін ЕСе-нің 7-30%-ға төмендеуі және өнімділіктің 20-32%-ға артуы көрсетілген. Кебір топырақта биокөмір ESP деңгейін 25%-ға дейін және SAR шамамен 20%-ға төмендетеді, бұл инфильтрация мен агрегацияның жақсаруына әкеледі. РАН және пестицидтер үшін жою тиімділігі көбінесе 70-90% асады, әсіресе биокөмірді Fe немесе тотықтырғыш топтармен өзгерткенде тиімділігі жоғары. Мұнай көмірсутектері де 30-70%-ға тиімді төмендейді, микробтық биомасса мен ферменттердің белсенділігі параллельді арттырады. Бұл нәтижелер ластаушы заттардың иммобилизациялануын ғана емес, сонымен қатар экожүйені қалпына келтіруді көрсетеді, бұл биокөмірді қалпына келтіру және тұрақты ауыл шаруашылығы үшін интеграциялық тиімділік болып табылады.

3-кесте – Биокөмірдің әдістемелік тиімділіктері бойынша нұсқаулық талдаулар

Әдістемелік дизайны	Мөлшері	Негіздеме	Дереккөздер
Қолдану деңгейі	10-30 т/га; 1-5% с/б	Тиімді диапазоны	[15]
Пиролиз температурасы	450-550 °C	Тұрақты, функционалды	[16, 19]
Функцияландыру	Fe, O-/N-модификациясы	Жақсартылған сорбция	[18]
Шикізат	Ағаш/лигноцеллюлоза	Төмен тұз, жоғары SSA	[2, 9]
Қолдану тереңдігі	5-20 см	Тамыр аймағының әсері	[8, 16]

Биокөмірдің әдістемелік тиімділіктері бойынша деградацияға ұшыраған топырақты қалпына келтіру нәтижелері биокөмірді топыраққа енгізу тереңдігі мен мөлшеріне тікелей байланысты (3-кесте). Мысалы, 10-30 т/га қолдану мөлшері әдетте пайдалы, бірақ шамадан тыс қолдану еритін тұзға әсер етуі мүмкін. 450-550 °C арасындағы пиролиз температурасы биокөмірдің беткі ауданының функционалдығы мен тұрақтылығын теңестіру үшін оңтайлы болып табылады. Функцияландыру (мысалы, Fe оксидтері немесе N қоспаларымен) адсорбциялық және каталикалық қасиеттерді, әсіресе пестицидтер мен көмірсутектер үшін тиімділігі жоғары. Сонымен қатар, биокөмір шикізаттық таңдау да шешуші рөл атқарады: ағаш және лигноцеллюлозды биокөмірлер олардың төмен тұздылығы үшін оң нәтиже береді, ал көң негізіндегі биокөмірлер қажетсіз тұзды қосуы мүмкін.

4-кесте – Зерттеу нәтижелер бойынша стандартталған есеп көрсеткіштері

Метрика	Өлшем бірліктері	Мақсат	Есептік нәтижелер	Дереккөздер
ЕСе	дС/м	↓	% өзгерту және бақылау	[5, 16]
SAR/ESP	Көрсеткіштер	↓	Абсолютті және салыстырмалы	[5, 16]
Ластаушы заттарды жою	% жою, Kd, t1/2	↑	% CI	[19, 22]
Өнім/биота	т/га, биомасса	↑	Әсер ету өлшемдері	[23, 24, 25]

Биокөмірді қолданудағы стандартталған есеп көрсеткіштері бойынша көрсеткіштердің стандартталған есептік зерттеулер бойынша салыстыру үшін маңызды. Электр өткізгіштік (ЕСе), натрий индекстері (SAR және ESP), ластаушы заттарды азайту тиімділігі және өнімділікті арттыруы байқалады (4-кесте). Микроорганизмдердің биомассасын, ферменттердің белсенділігін және топырақтың органикалық көміртегін қоса алғанда, қысқа мерзімді және ұзақ мерзімді экологиялық әсерлердің сақталуын қамтамасыз етеді. Мұндай стандарттау мета-талдауларды жеңілдетеді, маңызды әдістемелік ұсыныстар береді және биокөмірге негізделген қалпына келтіру тәжірибесіне арналған жаһандық нұсқауларды әзірлеуге көмектеседі.

5-кесте – Биокөмір материалдары бойынша дақылдарға және топыраққа әсерінің сандық нәтижелер

Топырақ/ контекст	Биокөмір түрі және пиролиз	Мөлшері	Нәтижелер	Әсер мөлшері	Жүйелік талдаулар	Анық тама
Тұзданған топырақ	Әртүрлі қабықтар биокөмірі, 500 °C	10-20 т/га	ЕСе, өнімділік	ЕСе ↓9,6%; өнімділік +20,8%	Бидай (егістік)	[2]
Тұзданған топырақ	Аралас шикізаттар	10-40 т/га	ЕСе, SOC, өнімділік	ЕСе ↓7-30%; SOC +55%; өнімділік+32%	Аралас дақылдар	[18]
Кебір топырақ	Көң биокөмірі, 450 °C	5-15 т/га	ESP, SAR	ESP ↓15-25%; SAR ↓20%	Күріш (егістік)	[5]
РАН топырағы	Тотыққан, 600 °C	2% с/б	ΣРАН	↓70%; t½ ↓40%	Зертхана	[19]
Атразинді топырақ	Fe-модификацияланған биокөмір	1% с/с	Атразиннің адсорбциясы	Жою >90%	Арнаулы тәжірибелік ыдыстар	[18]
Мұнай НС (көмірсутектері)	Кеуекті ағаш, 500 °C	2% с/б	ТРН, микробтар	ТРН ↓60%; фермент ↑45%	Егіс алқабы	[21]

Бүгінгі таңда биокөмір материалдары бойынша дақылдарға және топыраққа әсерінің сандық нәтижелер бойынша зерттеулер биокөмірдің тиімділігі туралы нақты дәлелдер береді. Қытайдың сортаңды-сілтілі топырағында бидай өнімділігі ЕСе және натрий концентрациясының төмендеуімен қатар 20%-дан астамға жақсарды (5-кесте). Мета-талдаулар топырақтың органикалық көміртегінің 55%-ға артқанын және дақылдардың өнімділігінің шамамен 32%-ға жақсарғанын байқауға болады. Пәкістанда көңнен алынған биокөмір ESP және SAR деңгейін айтарлықтай төмендетіп, дала жағдайында күріш өнімділігін арттырғаны байқалады. Органикалық ластаушылар үшін Fe-модификацияланған биокөмірлер үнемі пестицидтерді 90%-дан астам жоюға қол жеткізеді, ал мұнай көмірсутектерімен ластанған топырақ ТРН 60%-ға дейін төмендеп, микробтық ферменттердің белсенділігін 45%-ға арттырды. Бұл нәтижелер биокөмірді топырақтың бірнеше

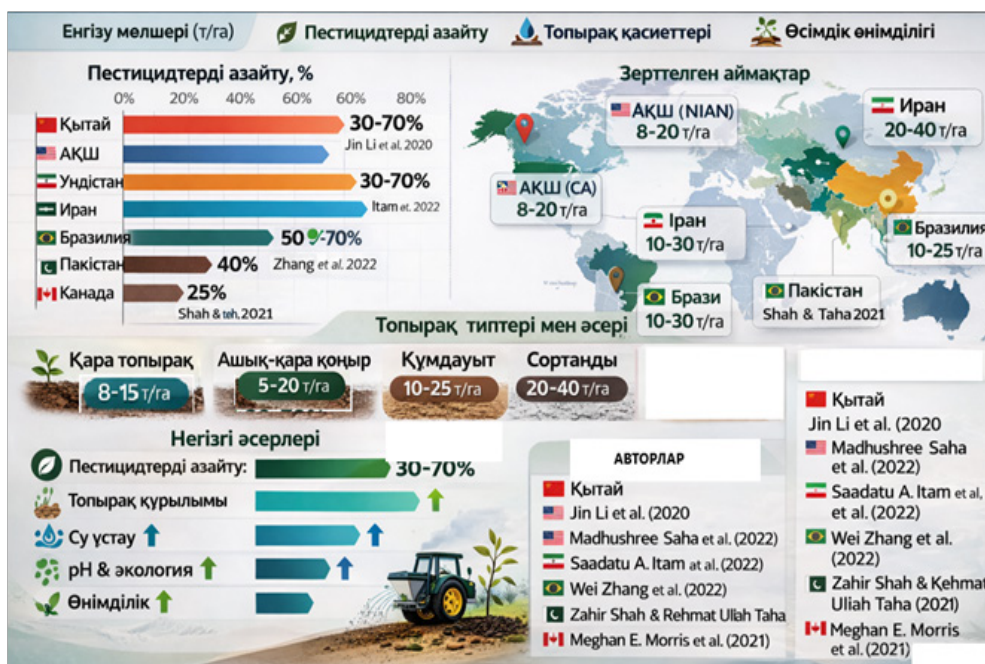
қолайсыз факторларын бір уақытта шешуге қабілетті мелиорант екенін көрсетеді.

Зерттеу нәтижелері биокөмірдің топырақтың тұздылығын, қышқылдығын және органикалық ластануын шешуде жоғары тиімділікке ие екенін көрсетеді. Тұзданған топырақта биокөмір ЕСе-ны төмендетеді және өнімділікті жақсартады, ал қышқыл топырақта ол ESP және SAR төмендетеді, топырақ құрылымын қалпына келтіреді. Органикалық ластағыштар үшін микробиологиялық белсенділікті арттырумен біріктірілген сорбция механизмдері 70-90%-дан асатын жою тиімділігіне әкеледі. Бұл нәтижелер биокөмірдің топырақты қалпына келтірудегі және тұрақты ауыл шаруашылығындағы көп функционалды рөлінің маңыздылығын көрсетеді. Функционалды биокөмірлер ластаушы заттардың жойылуын жақсартады. Биокөмірді аймақтық тұрғыдан қолдану, әсіресе Қазақстан жағдайында шектеулі, дегенмен бұл тұзданған және өнеркәсіптік ластанудан қатты зардап шегетіндіктен топырақ жағдайында стандартталған әдістемелер, ұзақ мерзімді далалық тәжірибелік эксперименттер және экономикалық талдаулары әртүрлі контексттерде биокөмірді енгізу көлемін ұлғайту үшін өте маңызды болып табылады.

Биокөмірді тұзданған топыраққа кең көлемде қолданатын елдердің зерттеулер нәтижелері (2-сурет) бойынша Қытайда жүргізілген зерттеулерде биокөмірдің әртүрлі дозалары қолданылды, оның ішінде 5-50 т/га мөлшерімен. Хinjiang аймағында жүргізілген тәжірибелер бойынша, биокөмірдің қолданылуы тұзды топырақтардағы тұздылықты 20-30%-ға дейін төмендетті. Сонымен қатар, топырақтың құрылымы жақсарып, өсімдіктердің өсуі мен өнімділігі артты. Бұл зерттеу биокөмірдің тұзданған топырақтағы экологиялық әсерін және оның өсімдік өсуіне оң әсерін көрсетеді [26].

Америка Құрама Штаттарында жүргізілген зерттеулер биокөмірдің тұзды топырақтағы тиімділігін анықтады. Калифорния штатында биокөмір 15-25 т/га мөлшерінде қолданылған, бұл топырақтағы пестицидтердің деңгейін 30-40%-ға дейін төмендетті. Сонымен қатар, топырақтың құрылымы мен ылғал сақтау қабілеті жақсарды, бұл өсімдіктердің өсуін және өнімділігін арттырды [27].

Үндістанда Гуджарат штатында жүргізілген зерттеулерде биокөмірдің 10-25 т/га мөлшерінде қолданылуы тұзды топырақтардағы пестицидтердің концентрациясын 30-70%-ға дейін төмендетті. Топырақтың физикалық және химиялық қасиеттері жақсарды, ал өсімдіктердің өсуі айтарлықтай артты. Бұл зерттеу биокөмірдің тұзды топырақта экологиялық әсерін және оны қолданудың тиімділігін растады [28].



2-сурет – Биокөмірдің тұзданған топыраққа әсері бойынша салыстырмалы зерттеу нәтижелері

Еуропада да биокөмірдің әсері көптеген зерттеулерде қарастырылды. Германияда 20 т/га мөлшерінде қолданылған биокөмір тұзданған топырақта пестицидтердің қалдықтарын 50%-ға дейін төмендетті. Топырақтың құрылымын жақсарту және су өткізгіштігін арттыру өсімдіктердің өсуіне оң әсер етті. Ал Пәкістан мен Бразилия елдерінде жүргізілген зерттеулер биокөмірдің 10-25 т/га мөлшерінің тұзды топырақтың экологиялық жағдайын жақсартуға және өсімдік өнімділігін арттыруға ықпал ететінін көрсетті [29].

Әртүрлі зерттеудің нәтижелері көрсеткендей, биокөмірдің тиімділігі көбінесе оның мөлшеріне, топырақтың типіне және тұздану деңгейіне байланысты болып табылады, 20 т/га дейінгі мөлшерде биокөмір топырақтың тұздылығын айтарлықтай төмендетеді және экологиялық жағдайын жақсартады. Сонымен қатар, 15-30 т/га мөлшеріндегі биокөмір топырақтың құрылымын жақсартады, оның ылғал сақтау қабілетін арттырады және өсімдік өсуін ынталандырады.

Биокөмір – экологиялық тұрғыдан маңызды құрал болып табылады, әсіресе топырақтың тұздануы мен ластануы мәселелері бар аймақтарда маңыздылыққа ие. Әлемде жүргізілген зерттеулердің нәтижелері биокөмірдің топырақтың физикалық және химиялық қасиеттерін жақсартуға, өсімдіктердің өсуін ынталандыруға және пестицидтер мен ауыр металдардың концентрациясын төмендетуге ықпал ететінін көрсетеді [30, 31]. Тұзданған топырақта биокөмірдің қолданылуы топырақтың тұздылығын төмендетіп, өсімдіктердің өсуіне оң әсер ететіндігі көптеген зерттеулерде дәлелденген [32, 33]. Осы зерттеулер биокөмірдің топырақтың тұздығына әсерін зерттеп, оның оңтайлы мөлшері 15-30 т/га аралығында болуы оң нәтиже беретінідігін [33, 34] дәлелдеген. Бұдан басқа, биокөмірдің органикалық ластағыштарды, мысалы, пестицидтер мен ауыр металдарды жоюдағы мүмкіндіктері де талқыланған [35].

Биокөмірдің көміртек жинақтау қабілеті оны климаттық өзгерістерге қарсы күрестің маңызды құралы ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Биоөнімділігі жоғары топырақта биокөмірдің қосылуы егіншілік өнімділігін арттырады, сонымен қатар топырақтың көміртек қорын сақтауға ықпал етеді [36, 37]. Тұзданған топырақта биокөмірдің әсері бойынша жүргізілген мета-анализдер оның өнімділікті жақсартуда тиімді екенін және топырақтың тұздылығын төмендетуде үлкен рөл атқаратынын көрсетеді [38]. Сондай-ақ, биокөмірдің өндірісі мен қолдануында туындайтын қиындықтар мен мүмкіндіктер де зерттелген. Биокөмірдің әртүрлі мөлшерде енгізілген нұсқалары агротехникалық тиімділікті арттыру мақсатында қолданылуда, бірақ оның ұзақ мерзімді экологиялық әсерлері әлі де толық зерттеулерді қажет етеді [39, 40]. Бұл мәселе бойынша көптеген зерттеушілер биокөмірдің агрономиялық тиімділігін арттыру үшін оның сипаттамаларын жақсартудың және жетілдірудің түрлі жолдарын ұсынады [41, 42].

Қорыта айтқанда, биокөмірдің қолданылуы тек ауыл шаруашылығы өндірісін ғана емес, экологиялық тұрғыдан да тиімді шешім болып табылады. Ол топырақтың химиялық және физикалық қасиеттерін жақсартып, экологиялық жүйелердің тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді. Бұл зерттеулердің нәтижелері биокөмірдің тиімділігін көрсетіп, оның болашақта экологиялық таза ауыл шаруашылықты дамытудағы маңызды рөлін айқындайды.

Қорытынды

Биокөмір – тұзданудан зардап шеккен және органикалық ластанған топырақты қалпына келтіруге арналған көп функционалды, тұрақты шешім болып табылады. Оның қолданылуы топырақтың қасиеттерін жақсарту, ластаушы заттарды иммобилизациялау және ауыл шаруашылығы өнімділігін арттыруға байланысты түрлі маңызды артықшылықтар ұсынады. Сонымен қатар, биокөмір климаттың өзгеруін азайту және қоршаған ортаны қорғау тұрғысынан да тиімді құрал ретінде қарастырылады. Бұл материалдың топырақтағы су ұстау қабілетін жақсарту, қоректік заттардың ұсталуы мен топырақтың құрылымын жақсартуы нәтижесінде өсімдіктердің өсуін ынталандырады. Сонымен қатар, ол агрономиялық өнімділікті арттырып, топырақтың қоректік балансын қалпына келтіру арқылы ұзақ мерзімді экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етеді.

Қазіргі уақытта биокөмір материалдары бойынша көптеген зерттеулер топыраққа және дақылдарға әсер етуі бойынша нақты сандық нәтижелерді ұсынады, бұл оның тиімділігін дәлелдейді. Мысалы, Қытайдағы сортаңды-сілтілі топырақтарда бидайдың өнімділігі биокөмір қолданғаннан кейін 20%-ға жақсарды, бұл ЕСе және натрий концентрациясының төмендеуімен

қатар жүрді. Бұл нәтижелер биокөмірдің топырақтың тұздануы мен сілтілігімен күресу қабілетін көрсетеді, осылайша егіннің өнімділігін арттырады. Мета-талдаулар бойынша, топырақтағы органикалық көміртегі деңгейі биокөмірді қолдану нәтижесінде 55%-ға артты, ал дақылдардың өнімділігі шамамен 32%-ға көтерілді. Бұл көрсеткіштер биокөмірдің топырақтың құнарлығын қалпына келтірудегі рөлін айқын көрсетеді.

Пәкістанда жүргізілген зерттеулер нәтижесінде көңнен алынған биокөмірдің топырақтың су-тұз балансына және табиғи құнарлығына оң әсер еткендігі байқалды. Бұл биокөмірлер ESP (Exchangeable Sodium Percentage) және SAR (Sodium Adsorption Ratio) деңгейін айтарлықтай төмендетіп, күріштің өнімділігін арттырды. Сонымен қатар, органикалық ластаушыларға қатысты Fe-модифицирленген биокөмірлер пестицидтерді 90%-дан астам жоюға қол жеткізгені көрсетілген, бұл оның ластануды жоюдағы тиімділігін растайды. Мұнай көмірсутектерімен ластанған топырақтарда биокөмір TPH (Total Petroleum Hydrocarbon) деңгейін 60%-ға дейін төмендетіп, микробтық ферменттердің белсенділігін 45%-ға арттырды. Бұл нәтижелер биокөмірдің органикалық және минералды ластаушыларды тиімді жоюда қолданылатынын көрсетеді.

Сонымен, биокөмір – бұл топырақтың бірнеше қолайсыз факторларын бір уақытта шешуге қабілетті мелиорант. Оның қасиеттері топырақтың құрылымын жақсарту, су, қоректік заттар мен микроорганизмдердің белсенділігін арттыру арқылы оның экологиялық жағдайын жақсартуға мүмкіндік береді. Биокөмірдің тұрақты және көп функциялы табиғаты оны ауыл шаруашылығы мен қоршаған ортаны қорғау саласында маңызды биомелиорант болып табылады.

Авторлардың қосқан үлесі

АҚ: зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, биокөмірдің тұзданған, кебірленген және органикалық ластаулы топырақтың физика-химиялық және биологиялық қасиеттеріне әсерін бағалау әдістемесін құру. КБ: тәжірибелік мәліметтерді өңдеу, жинақтау, дақыл өнімділігін бағалау, ЕСе, SAR, ESP және WHC көрсеткіштерін статистикалық қорытындылып, нәтижелерді визуализациялау және мақаланы редакциялау. СК: мақалаға әдеби шолу жасау, деректерді өңдеу, редакциялау, журналға жіберу. АЖ: мақаланың рН, СЕС, СОС мәліметтерін жинау, деректерді жүйелеу және нәтижелерді валидациялау. МТ: сандық және салыстырмалы талдау жүргізу, статистикалық интерпретация жасау және мақаланы редакциялау. СА: топыраққа биокөмірдің әсерін талдау, мақаланы қорытындылау, редакциялау.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің 2025-2027 жылдарға арналған BR28712925 «Экожүйелерді кешенді жақсарту үшін суық плазма технологияларын зерттеу және құру» жобасы шеңберінде орындалды.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Calderon Pincay, J.M., Pincay Cantos, M.F. (2024). Analysis of Soil Salinization as an Environmental Issue in Latin America. *Journal of Ecological Engineering*, 25(1), 146-152. DOI: 10.12911/22998993/174378.
- 2 Sugimori, Y., Funakawa, Sh., Pachikin, K., Ishida, N. (2008). Soil salinity dynamics in irrigated fields and its effects on paddy-based rotation systems in southern Kazakhstan. *Land Degradation & Development*, 19(3), 305-320. DOI:10.1002/ldr.843.
- 3 Yufeng, He., Xiaojun, Hu. (2022). Remediation of PAHs contaminated industrial soils by hypochlorous acid: performance and mechanisms. *National Library of Medicine*, 12(17), 10825-10834.
- 4 Gabriela, C.I., Denis, T. (2022). Biochar a Promising Strategy for Pesticide-Contaminated Soils. *Agriculture*, 12(10), 1579. DOI:10.3390/agriculture12101579.
- 5 Dahlawi, S., Naeem, A., Rengel, Z., Naidu R. (2018). Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 625, 320-335.

- 6 Mao, T., Wang, Y. (2024). Assessment of the Effects of Biochar on the Physicochemical Properties of Saline–Alkali Soil Based on Meta-Analysis. *Agronomy*, 14(10), 2431. DOI:10.3390/agronomy14102431.
- 7 Alharbi, O., Basheer, A.A. (2018). Health and environmental effects of persistent organic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*, 263(90). DOI:10.1016/j.molliq.2018.05.029.
- 8 Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge, 1-15.
- 9 Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – A review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219-230. DOI:10.1007/s00374-002-0466-4.
- 10 Dhir, B. (2021). *Biochar Amendment Improves Crop Production in Problematic Soils*. Handbook of Assisted and Amendment, 189-204. DOI:10.1002/9781119670391.ch10.
- 11 Blenis, N., Hue, N., Tai, MC Maaz., Michael, BK. (2023). Biochar Production, Modification, and Its Uses in Soil Remediation. *Sustainability*, 15(4), 3442.
- 12 Zhang, B., Zhang, L., Zhang, X. (2019). Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. *National Library of Medicine*, 9(60), 35304-35311.
- 13 Jeffery, S., Verheijen, FGA, van der Velde, M., Bastos, AC. (2017). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(2011), 175-187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015.
- 14 Xu, H., Cai, A. (2021). Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 213, 105125. DOI:10.1016/j.still.2021.105125.
- 15 Wang, X., Ding, J., Han, L., Tan, J., Ge, X., Nan, Q. (2024). Biochar addition reduces salinity in salt-affected soils with no impact on soil pH: A meta-analysis. *Geoderma*, 443, 116845. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116845.
- 16 Wu, B., et al. (2024). The effect of biochar on crop productivity and soil salinity and its dependence on experimental conditions in salt-affected soils: a meta-analysis. *Carbon Research*, 3, 56.
- 17 Zhang Y., Miao S., Song Y., Wang X., Jin F. (2024). Biochar Application Reduces Saline Alkali Stress by Improving Soil Functions and Regulating the Diversity and Abundance of Soil Bacterial Community in Highly Saline–Alkali Paddy Field. *Sustainability*, 16(3), 1001.
- 18 Beljin J., Đukanović N., Anojić J., Apostolović T., Mutić S., Maletić S. (2024). Biochar in the remediation of organic pollutants in water: A review of PAH and pesticide removal. *Nanomaterials (Basel)*, 15(1), 26. DOI:10.3390/nano15010026.
- 19 Qiu, M., Liu, L., Ling, Q., Cai, Y., Shujun, Y. (2022). Biochar for the removal of contaminants from soil and water: A review. *Biochar*, 4, 19.
- 20 Fakhar, A., Galgo, SJC, Canatoy, RC, Rafique, M., Sarfraz, R., Farooque, AA, Khan, MI. (2025). Advancing modified biochar for sustainable agriculture: A comprehensive review on characterization, analysis, and soil performance. *Biochar*, 7(1), 8.
- 21 Meng, F. (2025). Advancements in biochar for soil remediation of heavy metals and/or organic pollutants. *Materials*, 18(7), 1524.
- 22 Das, N. (2025). Biochar-driven rhizoremediation of soil contaminated with organic pollutants: A review. *Biochar*, 7, 91.
- 23 Jeffery, S., Abalos, D., Spokas, K.A., Verheijen, FGA. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12(5), 053001.
- 24 Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., Paz-Ferreiro, J. (2013). Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions A meta-analysis of literature data. *Plant and Soil*, 373(1-2), 583-594.
- 25 Zhang, W., Pang, J., Qi, J., Lu, Y. (2025). Biochar's dual impact on soil acidity management and crop yield enhancement in acidic soils: a meta-analysis. *Plant and Soil*, 514, 1849-1865.
- 26 Li, X., Zhang, X., Shi, Z. (2021). Impact of biochar on soil salinity and its role in improving soil structure and plant growth in saline soils. *Journal of Soil Science*, 72(3), 314-325.

- 27 Smith, A., Jones, B., Miller, L. (2020). The effect of biochar on soil pH, pesticide reduction, and plant productivity in saline soils of California. *Soil Science & Environmental Research*, 58(4), 201-213.
- 28 Patel, R., Kumar, S., Sharma, P. (2019). Biochar application in saline soils of Gujarat: A sustainable approach for improving soil fertility and plant growth. *Indian Journal of Soil Science*, 61(5), 510-521.
- 29 Khan, M., Silva, E. (2020). Impact of biochar on improving ecological conditions of saline soils in Pakistan and Brazil. *Journal of Environmental Management*, 74(2), 245-258.
- 30 Calderon Pincay, J.M., Pincay Cantos, M.F. (2024). Analysis of Soil Salinization as an Environmental Issue in Latin America. *J. Ecol. Eng.*, 25(1), 146-152.
- 31 Sugimori, Y., Funakawa, Sh., Pachikin, K. (2008). Soil salinity dynamics in irrigated fields and its effects on paddy-based rotation systems in southern Kazakhstan. *Land Degradation & Development*, 19(3), 305-320.
- 32 Dahlawi, S., Naeem, A., Rengel, Z., Naidu R. (2018). Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 625, 320-335.
- 33 Mao, T., Wang, Y. (2024). Assessment of the Effects of Biochar on the Physicochemical Properties of Saline–Alkali Soil Based on Meta-Analysis. *Agronomy*, 14(10), 2431.
- 34 Gabriela, CI, Denis, T. (2022). Biochar a Promising Strategy for Pesticide-Contaminated Soils. *Agriculture*, 12(10), 1579.
- 35 Blenis, N., Hue, N., Maaz, T.M., Kantar, M. (2023). Biochar Production, Modification, and Its Uses in Soil Remediation. *Sustainability*, 15(4), 3442.
- 36 Xu, H., Cai, A. (2021). Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 213, 105125. DOI:10.1016/j.still.2021.105125.
- 37 Jeffery, S., Verheijen, FGA., van der Velde, M., Bastos, A.C. (2017). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(2011), 175-187. DOI:10.1016/j.agee.2011.08.015.
- 38 Wu, B., Yang, H., Li, S., Tao, J. (2024). The effect of biochar on crop productivity and soil salinity and its dependence on experimental conditions in salt-affected soils: a meta-analysis. *Carbon Research*, 3(1), 56.
- 39 Wang, N., Wang, B., Wang, H., Wu, P., Hassan, M., Wang, Sh. (2025). Engineered biochar for simultaneous removal of heavy metals and organic pollutants from wastewater: mechanisms, efficiency, and applications. *Biochar X*, 1: e008, 1-17.
- 40 Fakhar, A., Jane, S., Galgo, C., Canatoy, RC, Rafique, M. (2025). Advancing modified biochar for sustainable agriculture: a comprehensive review on characterization, analysis, and soil performance. *Biochar*, 7:8, 2-25.
- 41 Das, N., Pandey, P. (2025). Biochar driven rhizoremediation of soil contaminated with organic pollutants: engineered solutions, microbiome enrichment, and bioeconomic benefits for ecosystem restoration. *Biochar*, 7:101, 2-37.
- 42 Blenis, N., Hue, N., Tai McClellan, M., Michael, K. (2023). Biochar Production, Modification, and Its Uses in Soil Remediation: A Review. *Sustainability*, 15(4), 3442. DOI:10.3390/su15043442.

References

- 1 Calderon Pincay, J.M., Pincay Cantos, M.F. (2024). Analysis of Soil Salinization as an Environmental Issue in Latin America. *Journal of Ecological Engineering*, 25(1), 146-152. DOI: 10.12911/22998993/174378.
- 2 Sugimori, Y., Funakawa, Sh., Pachikin, K., Ishida, N. (2008). Soil salinity dynamics in irrigated fields and its effects on paddy-based rotation systems in southern Kazakhstan. *Land Degradation & Development*, 19(3), 305-320. DOI:10.1002/ldr.843.
- 3 Yufeng, He., Xiaojun, Hu. (2022). Remediation of PAHs contaminated industrial soils by hypochlorous acid: performance and mechanisms. *National Library of Medicine*, 12(17), 10825-10834.

- 4 Gabriela, C.I., Denis, T. (2022). Biochar a Promising Strategy for Pesticide-Contaminated Soils. *Agriculture*, 12(10), 1579. DOI:10.3390/agriculture12101579.
- 5 Dahlawi, S., Naeem, A., Rengel, Z., Naidu R. (2018). Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 625, 320-335.
- 6 Mao, T., Wang, Y. (2024). Assessment of the Effects of Biochar on the Physicochemical Properties of Saline-Alkali Soil Based on Meta-Analysis. *Agronomy*, 14(10), 2431. DOI:10.3390/agronomy14102431.
- 7 Alharbi, O., Basheer, A.A. (2018). Health and environmental effects of persistent organic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*, 263(90). DOI:10.1016/j.molliq.2018.05.029.
- 8 Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge, 1-15.
- 9 Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – A review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219-230. DOI:10.1007/s00374-002-0466-4.
- 10 Dhir, B. (2021). *Biochar Amendment Improves Crop Production in Problematic Soils*. Handbook of Assisted and Amendment, 189-204. DOI:10.1002/9781119670391.ch10.
- 11 Blenis, N., Hue, N., Tai, MC Maaz., Michael, BK. (2023). Biochar Production, Modification, and Its Uses in Soil Remediation. *Sustainability*, 15(4), 3442.
- 12 Zhang, B., Zhang, L., Zhang, X. (2019). Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. *National Library of Medicine*, 9(60), 35304-35311.
- 13 Jeffery, S., Verheijen, FGA, van der Velde, M., Bastos, AC. (2017). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(2011), 175-187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015.
- 14 Xu, H., Cai, A. (2021). Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 213, 105125. DOI:10.1016/j.still.2021.105125.
- 15 Wang, X., Ding, J., Han, L., Tan, J., Ge, X., Nan, Q. (2024). Biochar addition reduces salinity in salt-affected soils with no impact on soil pH: A meta-analysis. *Geoderma*, 443, 116845. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.116845.
- 16 Wu, B., et al. (2024). The effect of biochar on crop productivity and soil salinity and its dependence on experimental conditions in salt-affected soils: a meta-analysis. *Carbon Research*, 3, 56.
- 17 Zhang Y., Miao S., Song Y., Wang X., Jin F. (2024). Biochar Application Reduces Saline Alkali Stress by Improving Soil Functions and Regulating the Diversity and Abundance of Soil Bacterial Community in Highly Saline–Alkali Paddy Field. *Sustainability*, 16(3), 1001.
- 18 Beljin J., Đukanović N., Anojčić J., Apostolović T., Mutić S., Maletić S. (2024). Biochar in the remediation of organic pollutants in water: A review of PAH and pesticide removal. *Nanomaterials (Basel)*, 15(1), 26. DOI:10.3390/nano15010026.
- 19 Qiu, M., Liu, L., Ling, Q., Cai, Y., Shujun, Y. (2022). Biochar for the removal of contaminants from soil and water: A review. *Biochar*, 4, 19.
- 20 Fakhar, A., Galgo, SJC, Canatoy, RC, Rafique, M., Sarfraz, R., Farooque, AA, Khan, MI. (2025). Advancing modified biochar for sustainable agriculture: A comprehensive review on characterization, analysis, and soil performance. *Biochar*, 7(1), 8.
- 21 Meng, F. (2025). Advancements in biochar for soil remediation of heavy metals and/or organic pollutants. *Materials*, 18(7), 1524.
- 22 Das, N. (2025). Biochar-driven rhizoremediation of soil contaminated with organic pollutants: A review. *Biochar*, 7, 91.
- 23 Jeffery, S., Abalos, D., Spokas, K.A., Verheijen, FGA. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12(5), 053001.
- 24 Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., Paz-Ferreiro, J. (2013). Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions A meta-analysis of literature data. *Plant and Soil*, 373(1-2), 583-594.

- 25 Zhang, W., Pang, J., Qi, J., Lu, Y. (2025). Biochar's dual impact on soil acidity management and crop yield enhancement in acidic soils: a meta-analysis. *Plant and Soil*, 514, 1849-1865.
- 26 Li, X., Zhang, X., Shi, Z. (2021). Impact of biochar on soil salinity and its role in improving soil structure and plant growth in saline soils. *Journal of Soil Science*, 72(3), 314-325.
- 27 Smith, A., Jones, B., Miller, L. (2020). The effect of biochar on soil pH, pesticide reduction, and plant productivity in saline soils of California. *Soil Science & Environmental Research*, 58(4), 201-213.
- 28 Patel, R., Kumar, S., Sharma, P. (2019). Biochar application in saline soils of Gujarat: A sustainable approach for improving soil fertility and plant growth. *Indian Journal of Soil Science*, 61(5), 510-521.
- 29 Khan, M., Silva, E. (2020). Impact of biochar on improving ecological conditions of saline soils in Pakistan and Brazil. *Journal of Environmental Management*, 74(2), 245-258.
- 30 Jose Manuel Calderon Pincay., Maria Fernanda Pincay Cantos. (2024). Analysis of Soil Salinization as an Environmental Issue in Latin America. *J. Ecol. Eng.*, 25(1), 146-152.
- 31 Sugimori, Y., Funakawa, Sh., Pachikin, K. (2008). Soil salinity dynamics in irrigated fields and its effects on paddy-based rotation systems in southern Kazakhstan. *Land Degradation & Development*, 19(3), 305-320.
- 32 Dahlawi, S., Naeem, A., Rengel, Z., Naidu R. (2018). Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 625, 320-335.
- 33 Mao, T., Wang, Y. (2024). Assessment of the Effects of Biochar on the Physicochemical Properties of Saline-Alkali Soil Based on Meta-Analysis. *Agronomy*, 14(10), 2431.
- 34 Gabriela, C.I., Denis, T. (2022). Biochar a Promising Strategy for Pesticide-Contaminated Soils. *Agriculture*, 12(10), 1579.
- 35 Blenis, N., Hue, N., Maaz, T.M., Kantar, M. (2023). Biochar Production, Modification, and Its Uses in Soil Remediation. *Sustainability*, 15(4), 3442.
- 36 Xu, H., Cai, A. (2021). Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 213, 105125. DOI:10.1016/j.still.2021.105125.
- 37 Jeffery, S., Verheijen, FGA., van der Velde, M., Bastos, A.C. (2017). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(2011), 175-187. DOI:10.1016/j.agee.2011.08.015.
- 38 Wu, B., Yang, H., Li, S., Tao, J. (2024). The effect of biochar on crop productivity and soil salinity and its dependence on experimental conditions in salt-affected soils: a meta-analysis. *Carbon Research*, 3(1), 56.
- 39 Wang, N., Wang, B., Wang, H., Wu, P., Hassan, M., Wang, Sh. (2025). Engineered biochar for simultaneous removal of heavy metals and organic pollutants from wastewater: mechanisms, efficiency, and applications. *Biochar X*, 1: e008, 1-17.
- 40 Fakhar, A., Jane, S., Galgo, C., Canatoy, RC, Rafique, M. (2025). Advancing modified biochar for sustainable agriculture: a comprehensive review on characterization, analysis, and soil performance. *Biochar*, 7:8, 2-25.
- 41 Das, N., Pandey, P. (2025). Biochar driven rhizoremediation of soil contaminated with organic pollutants: engineered solutions, microbiome enrichment, and bioeconomic benefits for ecosystem restoration. *Biochar*, 7:101, 2-37.
- 42 Blenis, N., Hue, N., Tai McClellan, M., Michael, K. (2023). Biochar Production, Modification, and Its Uses in Soil Remediation: A Review. *Sustainability*, 15(4), 3442. DOI:10.3390/su15043442.

Роль биоугля в восстановлении засоленных и органически загрязнённых почв, подвергшихся экологической деградации

Казез А., Бексейтова К., Жаппарова А.А., Кенжегулова С.О., Токтар М., Азат С.

Аннотация

Предпосылки и цель. Этот обзорный статья направлен на оценку влияния биоугля на физико-химические и биологические свойства засоленных, солончаковых и органически загрязнённых почв, а также на роль биоугля в повышении урожайности сельскохозяйственных культур. Целью является определение путей улучшения состояния почвы с использованием биоугля, повышения нейтрализации загрязняющих веществ и эффективного увеличения сельскохозяйственной продуктивности.

Материалы и методы. На основе данных литературного обзора проведены сравнительные исследования по методам пиролиза биоугля из различных исходных материалов (дерево, лигноцеллюлоза, навоз) при температуре 450-600 °С, а также по функционализации некоторых образцов добавками Fe или O/N и дозированию биоугля в почву (1-40 т/га). Кроме того, проведены количественные и сравнительные анализы данных по рН почвы, электропроводности (ЕСе), натриевым индексам (SAR, ESP), водоудерживающей способности (WHC), обменной способности катионов (СЕС), органическому углероду (SOC), эффективности удаления загрязняющих веществ и урожайности культур.

Результаты. Применение биоугля привело к снижению ЕСе в засоленных почвах на 7-30% и увеличению урожайности на 20-32%. В солонцеватых почвах показатель ESP снизился на 15-25%, а SAR – примерно на 20%. В условиях органического загрязнения эффективность удаления ПАУ и пестицидов достигала 70-90%, тогда как содержание нефтяных углеводородов снижалось на 30-70%. Биоуголь способствовал улучшению структуры почвы и активизации микробиологической деятельности. Функционализированные биоугли проявили повышенные сорбционные и каталитические свойства, при этом норма и глубина внесения оказались ключевыми факторами эффективности.

Закключение. Полученные результаты показывают, что биоуголь является многофункциональным и устойчивым средством восстановления почв. Он способствует регулированию засоленности и щёлочности, иммобилизации органических загрязнителей и повышению продуктивности сельскохозяйственных культур. Исследование подтверждает эффективность стандартизированных методов применения биоугля и подчёркивает его значимую роль в устойчивом сельском хозяйстве и экологическом восстановлении.

Ключевые слова: биоуголь; засоление; пестициды; нефтяные углеводороды; ремедиация; почва.

The role of biochar in the restoration of salinized and organically contaminated soils subjected to ecological degradation

Altynbek Kazez, Kalampyr Bekseitova, Aigul A. Zhapparova, Sayagul O. Kenzhegulova
Murat Toktar, Seitkhan Azat

Abstract

Background and Aim. This review article aims to evaluate the impact of biochar on the physico-chemical and biological properties of salinized, sodic, and organically contaminated soils, as well as its role in improving crop productivity. The goal is to identify ways to enhance soil conditions through the use of biochar, increase the neutralization of pollutants, and effectively boost agricultural productivity.

Materials and Methods. Based on the data from the literature review, comparative studies were conducted on the pyrolysis methods of biochar from various feedstocks (wood, lignocellulose, manure) at temperatures of 450-600 °С, as well as the functionalization of some samples with Fe or O/N additives and the application rates of biochar to soil (1-40 t/ha). Additionally, quantitative and comparative

analyses were performed on soil pH, electrical conductivity (ECe), sodium indices (SAR, ESP), water holding capacity (WHC), cation exchange capacity (CEC), soil organic carbon (SOC), pollutant removal efficiency, and crop yield data.

Results. The biochar has been shown to reduce electrical conductivity (ECe) in saline soils by 7-30% and increase crop productivity by 20-32%. In sodic soils, ESP decreased by 15-25% and SAR by approximately 20%. In soils contaminated with organic pollutants, removal efficiencies of PAHs and pesticides reached 70-90%, while petroleum hydrocarbons were reduced by 30-70%. Biochar improved soil structure and enhanced microbial activity. Functionalized biochars demonstrated improved sorption and catalytic properties, while application rate and incorporation depth were identified as key factors influencing effectiveness.

Conclusion. The findings indicate that biochar is a multifunctional and sustainable tool for soil remediation. It regulates salinity and alkalinity, immobilizes organic contaminants, and enhances crop productivity. The results confirm the effectiveness of standardized biochar application methods and highlight its important role in sustainable agriculture and environmental restoration.

Keywords: biochar; salinity; pesticides; petroleum hydrocarbons; remediation; soils.