BIOCHAR – TUPROQLARNI YAXSHILASH, UGLEROD SEKVESTRATSIYASI VA EKOLOGIK REABILITATSIYA VOSITASI

Qurbonov F. – Termiz davlat universiteti o‘qituvchisi

Annotatsiya.

Ushbu tahliliy maqolada biocharning tuproqdagi barqarorligi, fizik degradatsiyasi, degradatsiyalangan tuproqlarning tiklanish mexanizmi, tuproq mikrobiomiga ta’siri, uglerod sekvistratsiyasi va issiqxona gazlari emissiyasini kamaytirish, shuningdek agrotoksikantlarni immobilizatsiya va degradatsiya qilish qobiliyati umumlashtirilgan. Tahlil shuni ko‘rsatadiki, biochar qishloq xo‘jaligida ko‘p qirrali vosita bo‘lib, uning samaradorligi xom ashyo turi, piroliz harorati, qo‘llash dozasi va tuproq sharoitiga bog‘liq holda o‘zgaradi. Shu bilan birga, uzoq muddatli effektlar qisqa muddatli tajribalarda kuzatilganidan pastroq bo‘lishi mumkin ekanligi aniqlangan, bu amaliy tavsiyalar ishlab chiqishda inobatga olishni taqozo etadi.

Kalit so‘zlar: biochar, tuproq unumdorligi, tuproq degradatsiyasi, uglerod sekvistratsiyasi, issiqxona gazlari, tuproq mikrobiomi, barqaror qishloq xo‘jaligi.

BIOCHAR AS A TOOL FOR SOIL IMPROVEMENT, CARBON SEQUESTRATION, AND ENVIRONMENTAL REHABILITATION

Kurbonov F. – Lecturer at Termez State University

Abstract.

This review article summarizes the stability and physical degradation of biochar in soil, the mechanisms of degraded soil restoration, its effects on the soil microbiome, its role in carbon sequestration and greenhouse gas emission reduction, as well as its capacity to immobilize and degrade agrotoxicants. The analysis indicates that biochar is a multifunctional tool in agriculture, with its effectiveness varying depending on feedstock type, pyrolysis temperature, application rate, and soil conditions. Furthermore, the findings suggest that long-term effects may be less pronounced than those observed in short-term experiments, highlighting the need to consider this difference when developing practical recommendations.

Keywords: biochar, soil fertility, soil degradation, carbon sequestration, greenhouse gases, soil microbiome, sustainable agriculture.

1. Kirish.

Zamonaviy qishloq xo‘jaligi ikki muammoli vaziyatga duch kelmoqda: bir tomondan oziq-ovqat xavfsizligini ta’minlash uchun hosildorlikni oshirish zarurati, ikkinchi tomondan esa tuproq resurslarining degradatsiyasi, iqlim o‘zgarishi va atrof-muhit ifloslanishi kuchayib borayotgani. BMT Tinch okean iqtisodiy hamkorlik tashkiloti ma’lumotlariga ko‘ra, o‘simlik yetishtirish tizimlari global issiqxona gazlari emissiyalarining sezilarli qismini hosil qiladi, shu jumladan N_2O – deyarli barcha antropogen manbalarning yarmidan ko‘pi aynan qishloq xo‘jaligi bilan bog‘liq. Shu bois tuproq sifatini yaxshilovchi, uglerodni uzoq muddat saqlovchi va issiqxona gazlari emissiyasini kamaytiruvchi texnologiyalarga talab kuchaymoqda.

Biochar – o‘simlik va hayvonot qoldiqlari, chiqindilar hamda boshqa organik biomassani kislorodsiz muhitda (piroliz) isitish orqali olingan uglerodbog‘ uglerodli modda bo‘lib, qishloq xo‘jaligi va ekologiya sohasida eng birinchi navbatda o‘rganilayotgan yechimlardan biri sanaladi. 2012 yilda Barrow biocharni tuproq degradatsiyasiga qarshi kurashish va qishloq xo‘jaligini yaxshilash potensialiga ega vosita sifatida tizimli baholagan [5]. O‘tgan o‘n yillikda olingan tajribaviy va meta-tahlil natijalari uning agroekologik ahamiyatini yanada ochib berdi: biochar tuproq fizik-kimyoviy xususiyatlarini yaxshilaydi, mikrobiologik faollikni regulyatsiya qiladi, og‘ir metallar va organik ifloslantiruvchilarni bog‘laydi hamda tuproqda uglerodni uzoq muddat saqlash imkonini beradi.

Shu bilan birga, ilmiy adabiyotlarda biochar samaradorligiga oid qarama-qarshi natijalar uchraydi: qisqa muddatli tajribalarda kuzatilgan ijobiy effektlar uzoq muddatda zaiflashishi, toksik moddalarni immobilizatsiya qilish va uni oziqlantiruvchi sifatida qayta ishlatish orqasidagi xavfsizlik masalalari to‘liq o‘rganilmagan. Shuning uchun biocharni keng miqyosda qo‘llashdan oldin ilmiy dalillarni tizimli umumlashtirish dolzarb ahamiyat kasb etadi.

Mazkur tahliliy maqolaning maqsadi – nufuzli xalqaro jurnallarda chop etilgan ilmiy maqolalar asosida biochar qishloq xo‘jaligida qo‘llashning zamonaviy ilmiy tasavvurini shakllantirish, mavjud dalillarni qiyosiy tahlil orqali umumlashtirish hamda amaliyot uchun asoslangan tavsiyalar ishlab chiqishdan iborat. Vazifalar sifatida: (1) biochar barqarorligi va fizik degradatsiyasi bo‘yicha dalillarni tizimlashtirish; (2) degradatsiyaga uchragan tuproqlarni tiklash mexanizmlarini yoritish; (3) tuproq mikrobiomiga va fermentativ jarayonlarga ta’sirini baholash; (4) issiqxona gazlari emissiyasiga ta’sirini tahlil qilish; (5) agrokimyo va organik ifloslantiruvchilarni bartaraf etishdagi rolini ko‘rsatish belgilab olindi.

2. Metod.

Maqolada tahlil obyekti sifatida 2009–2025 yillar oralig‘ida chop etilgan 10 ta ilmiy maqola qabul qilindi. Adiblarni tanlashda quyidagi mezonlarga amal qilindi: (1) nashr etilgan jurnalning xalqaro reytingli bazalarda indeksatsiyasi; (2) ilmiy dalillarning to‘liqligi – meta-tahlillar, tizimli sharhlar, original eksperimental tadqiqotlar aralash tanlab olindi; (3) mavzuning qishloq xo‘jaligi tuproqlariga bevosita aloqadorligi. Tanlangan adiblar quyidagi yo‘nalishlar bo‘yicha guruhlashtirildi: (a) biochar barqarorligi va fizik degradatsiyasi; (b) degradatsiyalangan tuproqlarni tiklash; (v) tuproq mikrobiomi va fermentlar; (g) issiqxona gazlari va uglerod sekvistratsiyasi; (d) ifloslanishni yumshatish mexanizmlari.

Tahlil metodikasi sifatida kontent-tahlil (har bir maqolaning maqsad, metod, natija va xulosa qismlarini ajratib ko‘rish) hamda qiyosiy-sintez tahlil (turli tadqiqotlarning natijalarini o‘xshash va farqli jihatlari bo‘yicha solishtirish) qo‘llanildi. Har bir dalil uning isbotlash kuchiga ($p<0.05$ isbot darajasi, tanlanma hajmi, meta-tahlil yoki bitta tajriba) ko‘ra baholandi.

3. Natijalar va muhokama.

3.1. Biochar barqarorligi va fizik degradatsiyasi.

Biocharning iqlimga qarshi kurashdagi asosiy qiymati uning tuproqda uglerod shaklida uzoq muddat saqlanish qobiliyatida. Wang, Xiong va Kuzyakov tomonidan o‘tkazilgan meta-tahlil shuni ko‘rsatadiki, biochar tuproqda asrlab davom etadigan vaqt oralig‘ida saqlanishi mumkin va undagi priming (qo‘zg‘atuvchi) effekti tuproq tarkibiga qarab turlicha namoyon bo‘ladi [1]. Bu natija biochar uglerodining klassik organik moddaga qaraganda sezilarli barqaror ekanini isbotlaydi va uni “uglerod passiv emissiya texnologiyasi” deb baholash ilmiy asosa ega.

Biroq Barbosa va hammualliflari (2025) biochar fizik degradatsiyasining uzoq muddatli effektlariga bag‘ishlangan so‘nggi tadqiqotlarida kanalizatsiya chiqindilari va bug‘doy poyasidan olingan biocharlarni tahlil qilib, ularning tuproqda qo‘llanilgandan keyin abiotik jarayonlar tufayli parchalanishi, suv ushlab qolish qobiliyati va uglerod barqarorligining vaqt bilan o‘zgarishini ta’kidlaydi [2]. Mualliflar biocharning tuproqdagi uzoq muddatli xatti-harakati faqat kimyoviy barqarorlik bilan emas, balki fizik parchalanish jarayonlari bilan ham belgilanishini ko‘rsatdi. Bu, laboratoriya sharoitidagi qisqa muddatli natijalarni maydonga ko‘chirishda ehtiyotkorlik talab etilishini anglatadi.

3.2. Degradatsiyalangan tuproqlarni tiklash va tuproq unumdorligi.

Barrow ning dastlabki tahlili biochar qishloq xo‘jaligi tuproqlarini yaxshilashda katta istiqbolga ega ekanini, ammo uning samarasi tuproq turi, iqlim va qo‘llash

texnologiyasiga bog‘liq holda o‘zgarishini ta’kidlagan edi [5]. Shu tadqiqotni davom ettiruvchi Qi va hammualliflari (2024) tomonidan o‘tkazilgan tizimli sharh biochar tuproq degradatsiyasini yumshatishdagi rolini tizimli tasvirlab, uning tuproq tuzilishi, suv rejimi va biokimyoviy xususiyatlariga ko‘p qirrali ta’sirini umumlashtirdi [4]. Dimitriadou va hammualliflari (2025) esa degradatsiyalangan tuproqlarni jonlantirish (revitalizing) bo‘yicha biochar tuproq sog‘lig‘i va unumdorligini oshirishdagi mexanizmlarini – nafaqat kimyoviy, balki fizik va biologik yo‘nalishlarni ham yoritib berdi [7].

Zhang va hammualliflari (2023) Xitoyning shimoli-sharqidagi degradatsiyaga uchragan qora tuproqlar ustida o‘tkazgan ilmiy tadqiqotida tuproq agregatlarining o‘lcham tarkibidan foydalanib, biochar qo‘shish tuproq organik uglerodi, kationlar almashinuv qobiliyati va namlik miqdorini sezilarli oshirishini, bu o‘z navbatida agregat barqarorligini mustahkamlashini ko‘rsatdi [6]. Ayniqsa qiziqarli xulosalaridan biri – biochar megaagregatlarda (0,25–2 mm) bakteriya jamoasi konsentratsiyasini oshirishi va mikroorganizmlar o‘zaro aloqalarini kuchaytirishi hamda uglerod fiksatsiyasi va nitrifikatsiya bilan bog‘liq genlarning (rbcL, acsA, nifH, amoA) ifodalanishini oshirishi edi. Demak, biocharning tuproqni tiklash effekti faqat kimyoviy modifikatsiya emas, balki mikrobiologik jarayonlarni qayta tashkil etish orqali ham amalga oshadi. Bu, qishloq xo‘jaligida uzoq yillar davomida intensiv degradatsiyaga uchragan yerlarni tiklash uchun biocharning istiqbolini asoslaydi.

3.3. Tuproq mikrobiomi va fermentativ jarayonlar dinamikasi.

Sheng va Zhu (2018) tuproqning pH reaksiyasidan kelib chiqqan holda biochar ta’sirini o‘rganib, biochar qo‘shish mikrob jamoasi tarkibini o‘zgartirib, uglerod sekvistratsiya potensialiga ta’sir qilishini ko‘rsatdi; ayniqsa kislotali ferralit tuproqlarda biocharning yuqoriroq parchalanishi CO_2 emissiyasining ortishiga olib kelishi qayd etildi [3].

Feng va hammualliflari (2023) besh qit’ada o‘tkazilgan 130 ta tadqiqotdan 923 ta kuzatuvni umumlashtirgan global meta-tahlilda biochar uglerod parchalovchi fermentlarga qo‘shilishi ligninaza faoliyatini 7,1% ga oshirishi, ayni paytda sellyulaza faoliyatini 8,3% ga kamaytirishi aniqlanganini ko‘rsatdi [8]. Ammo uzoq muddatli (1 yildan ortiq) qo‘llanilganda ligninaza:tsellyulaza nisbati 36,1% ga oshib, tuproq organik uglerodining sekvistratsiyasi qisqa muddatli davrdagi 87,5% ga nisbatan atigi 25,1% ga tushib qoladi. Bu, ilgari o‘tkazilgan tajribalarda mikroorganizmlarning fiziologik akklimatizatsiyasi hisobga olinmagan holda biocharning uzoq muddatli uglerod sekvistratsiya potensiali ortiqcha baholangan bo‘lishi mumkin ekanini anglatadi.

3.4. Issiqxona gazlari emissiyasi va agrokimyoviy moddalar taqdiri.

Spokas va hammualliflari (2009) Minnesota shtatidagi silt-loam tuproqda o‘tkazgan pioner tadqiqotlarida yog‘och biochar qo‘shish tuproq nafas olishi (CO_2 hosil bo‘lishi) barcha tekshirilgan dozalarda, N_2O hosil bo‘lishini esa 20% dan yuqori dozalarda sezilarli kamaytirishini, shu bilan birga metan (CH_4) oksidlanishini barcha dozalarda bostirishini aniqladi [9]. Shu bilan birga, biochar gerbisidlarni – atrazin va asetoxlorni – kuchli sorbsiyalab, ularning tuproqda saqlanish muddatini oshirishi va degradatsiyasini sekinlashtirishi ko‘rsatildi. Bu natijalar biochar issiqxona gazlari bilan kurashish vositalarining bir ekanini, ammo uning o‘zi barcha gazlar bo‘yicha bir xil yo‘nalishda ishlamasligini (CH_4 oksidlanishining bostirilishi salbiy tomon) ko‘rsatadi. Bundan tashqari, gerbisid saqlanishining uzayishi ekinni keyingi zararkunandalarga qarshi himoya qilishda iyjobiy bo‘lsa-da, moddaning muhitdagi taqdiri nuqtai nazaridan ikki qirrali effekt yaratadi.

3.5. Organik ifloslantiruvchilarni oksidativ degradatsiya qilish.

Biochar nafaqat adsorbent, balki katalizator sifatida ham qo‘llanilishi zamonaviy tadqiqotlar yo‘nalishlaridan biridir. Liu va hammualliflari (2020) tuproqda bisfenol A (BPA) ni biochar yordamida persulfatni aktivlashtirish orqali samarali degradatsiya qilish mumagli ekanini ko‘rsatdi [10]. $SO_4{\cdot}^-$ va ·OH radikallari ishtirokidagi bu jarayon ifloslangan tuproqlarni tozalashda kimyoviy reagentlarning minimal miqdorida ishlatilishini va jarayonning nisbatan tejamkorligini ta'minlaydi. Bu yo‘nalish qishloq xo‘jaligi va sanoat chiqindilari ifloslangan maydonlarni bioremedia qilishda biochar vazifasining kengayib borayotganini ko‘rsatadi.

3.6. Umumiy muhokama: dalillarning sintezi va qarama-qarshiliklar.

Tahlil qilingan 10 ta maqoladan kelib chiqqan asosiy ilmiy tasavvur shundan iboratki, biochar qishloq xo‘jaligida “bir modda – ko‘p funksiya” prinsipi bilan ishlaydi: u (1) tuproq fizik-kimyoviy xususiyatlarini yaxshilaydi, (2) mikrobiologik jamoani qayta shakllantirib agregat barqarorligini oshiradi, (3) uglerodni uzoq muddat saqlab, issiqxona gazlari emissiyasini kamaytiradi, (4) og‘ir metallar va organik ifloslantiruvchilarni bog‘laydi yoki ularni katalitik parchalaydi, (5) oziq elementlarning foydalanilish samaradorligini oshiradi.

Shu bilan birga, bir qator qarama-qarshilik va bilim bo‘shliqlari mavjud. Birinchidan, qisqa muddatli tajribalarda (1 yilgacha) kuzatilgan kuchli ijobiy effektlar (SOC +87,5%) uzoq muddatda sezilarli zaiflashadi (+25,1%) [8]; ikkinchidan, biochar dozasi ortiqcha bo‘lganda energiya xarajatlari va iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq emasligi; uchinchidan, turli tuproqlar (kislotali, sho‘rlangan, qora tuproq) turlicha javob qaytarishi [3, 6]. Shu sababli biochar qo‘llash texnologiyasini ishlab

chiqishda dozani, xom ashyoni, piroliz haroratini va mahalliy tuproq sharoitini hisobga oladigan regionallashtirilgan yondashuv zarur.

O‘zbekiston uchun ushbu yo‘nalishning ahamiyati alohida e’tirof etilishi lozim: paxta po‘stlog‘i, tok po‘stlog‘i, don qoldiqlari va chorva chiqindilari kabi boy biomassa zaxiralari mavjud bo‘lib, ulardan biochar ishlab chiqarish qishloq xo‘jaligi chiqindilarini qayta ishlatish (tirkarma iqtisodiyot) bilan birga, sho‘rlangan va degradatsiyalangan yerlarni tiklash uchun istiqbolli vosita bo‘lib xizmat qilishi mumkin. Bunda talab qilinadigan ish sifatida biochar mahalliy xom ashyodan olish texnologiyasini, sho‘rlangan tuproqlarda qo‘llash dozasini va uzoq muddatli agroekologik monitoringni o‘z ichiga olgan kompleks tadqiqotlar o‘tkazish maqsadga muvofiqdir.

3.7. Biochar ishlab chiqarish texnologiyasi va xom ashyo turlari.

Biochar sifati va qishloq xo‘jaligidagi qo‘llash sohasi asosan ikki omil – xom ashyo turi va piroliz haroratiga bog‘liq. Feng va hammualliflari meta-tahlilida ko‘rsatganidek, 350–550 °C va undan yuqori haroratda tayyorlangan biocharlar sellyulaza faoliyatini mos ravishda 10,0% va 6,7% ga kamaytiradi, past haroratli (<350 °C) biochar esa ligninaza faoliyatini 16,0% ga oshiradi [8]. Bu shuni anglatadiki, yuqori haroratli biochar uglerodni uzoq muddat saqlash uchun, past haroratli biochar esa tuproq biologik faoliyatini tezda oshirish uchun maqsadga muvofiqroq. Xom ashyo bo‘yicha yog‘och, o‘t-o‘simlik chiqindilari, chorva go‘ngi va qishloq xo‘jaligi qoldiqlari turlicha fizik-kimyoviy xususiyatlarga ega biocharlar hosil qiladi: masalan, go‘ng asosidagi biochar oziq elementlarga boy, lekin og‘ir metallar kontsentratsiyasi yuqori bo‘lishi mumkin, shuning uchun xom ashyoni oldindan ekotoksikologik baholash talab etiladi.

O‘zbekiston sharoitida eng istiqbolli xom ashyo manbalari qatoriga paxta po‘stlog‘i (yillik xom ashyo zaxirasi yuqori, lignin-moddasi tarkibi qulay), tok po‘stlog‘i, bug‘doy somoni kiradi. Ushbu qoldiqlarni oddiy kuydirish o‘rniga piroliz usulida biochar ishlab chiqarish bir yo‘la ikki muammoni yechadi: energetik va ekologik zarar keltiruvchi chiqindi yo‘qotish hamda qishloq xo‘jaligi uchun qimmatli organik o‘g‘it olish. Bunda axborot texnologiyalari ham muhim rol o‘ynaydi: qishloq xo‘jaligi chiqindilari zaxiralarini xaritalash, biochar ishlab chiqarish agregatlarini joylashtirish va tuproqqa aralashtirish jarayonlarini raqamlashtirish iqtisodiy samaradorlikni oshiradi.

4. Xulosa.

Tahlil shuni ko‘rsatadiki, biochar zamonaviy qishloq xo‘jaligining barqaror rivojlanishida ko‘p qirrali vosita bo‘lib qolmoqda. U tuproq degradatsiyasini

yumshatish, mikrobiologik faollikni regulyatsiya qilish, uglerodni sekvistratsiya qilish va ifloslanishni kamaytirish yo‘nalishlarida ilmiy isbotlangan effektlarga ega. Shu bilan birga, quyidagi asosiy xulosalar va tavsiyalar ishlab chiqiladi:

1) Biochar uglerodi tuproqda asrlab saqlanishi mumkin bo‘lsa-da, uning fizik degradatsiyasi va mikroorganizmlarning vaqt bilan akklimatizatsiyasi uzoq muddatli samaradorlikni belgilaydi; shu bois maydon tajribalari minimal 3–5 yillik monitoringni talab qiladi [1, 2, 8].

2) Tuproqni tiklash effekti agregatlar darajasida mikroorganizmlar jamoasi faoliyatini qo‘zg‘atish orqali amalga oshadi; bu biochar bilan mikrobial biokompostlar yoki funktsional mikroorganizmlarni qo‘shimcha qo‘llash istiqbolini ochib beradi [6].

3) Issiqxona gazlari bo‘yicha effekt selektiv: CO_2 va N_2O emissiyasini kamaytiradi.

4) Xom ashyo turi va piroliz harorati biochar xususiyatlarini keskin o‘zgartirib, uni maxsus maqsadlar (oziq-ovqat, tozalash, kataliz) uchun “buyurtma asosida” tayyorlash imkonini beradi; buning uchun standartlashtirish va sifat mezonlari ishlab chiqilishi lozim [7, 10].

5) Amaliyotga joriy etishda iqtisodiy jihatdan maqbul dozalarni aniqlash, mahalliy biomassa zaxiralaridan foydalanish va qishloq xo‘jaligi chiqindilarini qayta ishlatish zanjirini tashkil etish ustuvor vazifa bo‘lib qoladi. Kelgusi tadqiqotlar iqlim sharoitlari va tuproq tipologiyasiga ko‘ra diferensiallangan biochar texnologiyalarini ishlab chiqishga qaratilishi zarur.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Wang J., Xiong Z., Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects // GCB Bioenergy. – 2016. – Vol. 8(3). – P. 512–523. DOI: 10.1111/gcbb.12266.

2. Barbosa T.A., Gomes Filho R.R., Wisniewski A., Mašek O. Biochar physical degradation: Long-term effects as soil amendments // Biomass & Bioenergy. – 2025. – Vol. 203. – Art. 108284. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.108284.

3. Sheng Y., Zhu L. Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 622–623. – P. 1391–1399. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.337.

4. Qi S., Degen A., Wang W., Huang M., Li D., Luo B. et al. Systemic review for the use of biochar to mitigate soil degradation // GCB Bioenergy. – 2024. – Vol. 16(6). – Art. e13147. DOI: 10.1111/gcbb.13147.

5. Barrow C.J. Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture // Applied Geography. – 2012. – Vol. 34. – P. 21–28. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.09.008.

6. Zhang C., Zhao X., Liang A., Li Y., Song Q., Li X. et al. Insight into the soil aggregate-mediated restoration mechanism of degraded black soil via biochar addition: Emphasizing the driving role of core microbial communities and nutrient cycling // Environmental Research. – 2023. – Vol. 228. – Art. 115895. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115895.

7. Dimitriadou S., Isari E.A., Grilla E., Kokkinos P., Kalavrouziotis I.K. Revitalizing Degraded Soils: The Role of Biochar in Enhancing Soil Health and Productivity // Environments. – 2025. – Vol. 12(9). – Art. 324. DOI: 10.3390/environments12090324.

8. Feng J., Yu D., Sinsabaugh R.L., Moorhead D.L., Andersen M.N., Smith P. et al. Trade-offs in carbon-degrading enzyme activities limit long-term soil carbon sequestration with biochar addition // Biological Reviews. – 2023. – Vol. 98(4). – P. 1184–1199. DOI: 10.1111/brv.12949.

9. Spokas K.A., Koskinen W.C., Baker J.M., Reicosky D.C. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil // Chemosphere. – 2009. – Vol. 77(4). – P. 574–581. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2009.06.053.

10. Liu J., Jiang S., Chen D., Dai G., Wei D., Shu Y. Activation of persulfate with biochar for degradation of bisphenol A in soil // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 381. – Art. 122637. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122637.