AGROPHYSICAL PROPERTIES OF RECULTIVATED SOILS AND THEIR CHANGES UNDER THE INFLUENCE OF FOREST PLANTATIONS OF VARIOUS SPECIES COMPOSITION

Turko V.M.,
Ph.D. in Agricultural Sciences, Associate Professor,
Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine
Moroz V.V.,
Ph.D. in Agricultural Sciences, Associate Professor,
West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine
Turko M. V.
Master's degree, Department of Forestry and Landscape Architecture,
Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine

АГРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕКУЛЬТИВОВАНИХ ҐРУНТІВ ТА ЇХ ЗМІНА ПІД ВПЛИВОМ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ РІЗНОГО ПОРОДНОГО СКЛАДУ

Турко В.М.
кандидат с.-г. наук, доцент,
Поліський національний університет, м. Житомир, Україна
Мороз В.В.
кандидат с.-г. наук, доцент,
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна
Турко М.В.
магістр кафедри лісового та садово-паркового господарства,
Поліський національний університет, м. Житомир, Україна

Abstract

The agrophysical properties of soils reclaimed after ilmenite ore extraction at Shershnivske forestry (Zhytomyr Polissia) and the patterns of their changes under forest stands of various species composition were investigated. On three temporary sample plots in 52-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands with varying proportions of deciduous species, forest inventory and agrochemical soil analysis were conducted. It was established that the introduction of deciduous species (silver birch, black locust) into stand composition increases humus content by 10–14% (from 1.32 to 1.50%) and reduces soil salt acidity by 2–7% compared to pure pine stands. Productivity indicators (timber stock of 274–320 m³/ha versus 145 m³/ha in monocultures of age class 4–5) and sanitary condition (health index 2.6 in mixed stands versus 3.1–3.3 in pure pine stands) confirm the effectiveness of mixed reforestation schemes. Forest type transformation over 40 years (from A_1C to B_2DC) indicates gradual restoration of edaphic conditions under forest plantations.

Анотація

Досліджено агрофізичні властивості рекультивованих після видобутку ільменітових руд ґрунтів Шершнівського лісництва (Житомирське Полісся) та закономірності їх зміни під впливом лісових насаджень різного породного складу. На трьох тимчасових пробних площах у 52-річних деревостанах сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) із різною часткою листяних порід проведено таксаційний облік та агрохімічний аналіз ґрунтів. Встановлено, що введення до складу насаджень листяних порід (берези повислої, робінії звичайної) підвищує вміст гумусу на 10–14% (від 1,32 до 1,50%) та зменшує сольову кислотність ґрунту на 2–7% порівняно із чистими сосняками. Показники продуктивності (запас деревини 274–320 м³/га проти 145 м³/га у монокультурах 4–5 класу віку) та санітарного стану (індекс стану 2,6 у мішаних насадженнях проти 3,1–3,3 у чистих сосняках) підтверджують ефективність змішаних схем лісовідновлення. Трансформація типів лісу за 40 років (від A_1C до $B_2ДС$) свідчить про поступове відновлення едафічних умов під лісовими насадженнями.

Keywords: *Pinus sylvestris*, *Heterobasidion annosum*, humification, soil acidity, Tyurin method, ilmenite quarry, forest typological analysis, stand species composition, Irshansk Mining and Processing Plant.

Ключові слова: *Pinus sylvestris, Heterobasidion annosum*, гуміфікація, кислотність ґрунту, метод Тюріна, ільменітовий кар'єр, лісотипологічний аналіз, породний склад деревостану, Іршанський ГЗК.

ВСТУП

Видобуток корисних копалин відкритим способом спричиняє глибоке порушення ґрунтового покриву, призводячи до формування техногенних ландшафтів із принципово іншими фізичними, хімічними та біологічними властивостями субстрату (Bradshaw, 1997). Регіон Житомирського Полісся, де впродовж 1970–1980-х рр. здійснювався масштабний видобуток ільменітових руд Іршанським гірничо-збагачувальним комбінатом (ІГЗК), є однією з найбільш постраждалих лісогосподарських зон України.

Рекультивовані після гірничодобувних робіт ґрунти в умовах Полісся переважно представлені легкими за механічним складом субстратами (піщаними і супіщаними) із низькою родючістю, порушеним водним режимом та відсутнім природним гумусовим горизонтом (Шомко, Давидова, 2024). Ці характеристики суттєво обмежують лісорослинний потенціал і визначають ризики деградації насаджень у середньостроковій перспективі.

Лісова рекультивація розглядається як найефективніший спосіб відновлення таких земель (Frouz, 2013). Численні дослідження підтверджують, що деревні насадження поступово покращують агрофізичні властивості ґрунту: підвищують вміст органічної речовини, знижують щільність, покращують водний режим і активізують мікробіологічну діяльність (Misebo et al., 2023; Świątek & Pietrzykowski, 2021; Turko et al., 2025). Однак ефективність цих процесів суттєво залежить від породного складу насадження.

Ключовою проблемою лісовідновлення на рекультивованих землях Полісся є переважання чистих монокультур сосни звичайної, що мають низьку екологічну стійкість і призводять до швидкого поширення кореневої губки (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.). Водночас залишається недостатньо вивченим порівняльний вплив чистих соснових і змішаних насаджень на агрофізичний стан рекультивованих ґрунтів у реальних виробничих умовах Шершнівського лісництва.

Мета роботи – дослідити агрофізичні властивості рекультивованих ґрунтів та встановити закономірності їх зміни під впливом лісових насаджень різного породного складу в умовах Шершнівського лісництва Коростенського надлісництва.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Проблема відновлення агрофізичних властивостей рекультивованих ґрунтів під лісовими насадженнями має значну наукову базу. Загальновизнано, що техногенні субстрати характеризуються підвищеною щільністю, піщано-супіщаним гранулометричним складом та обмеженою водоутримувальною здатністю (Misebo et al., 2023; Świątek & Pietrzykowski, 2021). Рекультивовані площі Житомирського Полісся після видобутку ільменіту мають піщаний та супіщаний гранулометричний склад із низькою вологоутримувальною здатністю і низьким вмістом поживних речовин (Шомко, Давидова, 2024).

Результати польових і лабораторних досліджень переконливо свідчать, що лісові насадження здатні суттєво покращувати фізичні й агрохімічні властивості техногенних субстратів, однак ефект є тривалим і залежить від видового складу деревостану. Встановлено три ключові напрями впливу деревних рослин: збільшення вмісту органічного вуглецю за рахунок надходження рослинних решток, зниження щільності ґрунту та підвищення його пористості, а також поступове зростання вологоутримувальної здатності.

Щодо конкретних деревних порід, важливо відзначити особливу роль змішаних насаджень. Сосна звичайна на рекультивованих ґрунтах за 20–35 років відновлює лише близько 20–27% запасів органічного вуглецю порівняно з природними лісами; зміни концентруються у підстилці та верхніх 0–5 см ґрунтового профілю (Kołodziej et al., 2016). Натомість змішані насадження сосни з березою суттєво покращують кореневу біомасу і ґрунтові умови порівняно з монокультурами (Шомко, Давидова, 2024; Rahmonov et al., 2020).

Особливої уваги заслуговує роль азотфіксуючих видів. Дослідження А. А. Сірика підтверджують, що навіть незначна домішка робінії звичайної (*Robinia pseudoacacia* L.) здатна суттєво підвищити вміст доступного азоту у бідних техногенних ґрунтах (Сірик, Фучило, 2017). Цей ефект пояснюється симбіотичною азотфіксацією у кореневій системі та швидкою мінералізацією листяного опаду.

Трав'янисті угруповання у соснових насадженнях Полісся підвищують вміст гумусу, водотривкість агрегатів, водопроникність і покращують реакцію ґрунтового середовища (Spasić et al., 2023). Рекомендується застосовувати комплексну біологічну рекультивацію з обов'язковим введенням листяних порід і підліску, оскільки чисті соснові культури формують менш сприятливі ґрунтові властивості (Pietrzykowski et al., 2015; Pietrzykowski & Krzaklewski, 2007).

Таким чином, існуючі дослідження переконливо обґрунтовують перевагу змішаних насаджень над монокультурами для відновлення агрофізичних властивостей рекультивованих ґрунтів (Pretzsch et al., 2017; Pietrzykowski & Krzaklewski, 2007). Однак конкретні кількісні дані щодо змін вмісту гумусу та кислотності ґрунтів під різними типами насаджень на рекультивованих землях Житомирського Полісся в науковій літературі представлені недостатньо.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Дослідження проводились на рекультивованих після видобутку ільменітових руд землях Шершнівського лісництва Коростенського надлісництва Філії «Столичний лісовий офіс» ДП «Ліси України» (Житомирська обл.). Об'єктами дослідження слугували 52-річні лісові культури, створені у 1973 р. на площах, що вийшли з користування Іршанського ГЗК.

Надлісництво розташоване в зоні Українського Полісся. Переважаючими типами ґрунтів є підзолисті з різним механічним складом – від піщаних до суглинистих. Середньорічна температура становить 7–8°С, кількість опадів – 600–700 мм. Клімат помірно-континентальний з атлантичним впливом.

Дослідження проведено на трьох тимчасових пробних площах (ТПП) розміром 0,2 га у 39-му таксаційному кварталі. ТПП закладено за вимогами до лісовпорядних пробних площ, мінімальна кількість дерев домінуючої породи – не менше 200 шт./га. Пробні площі відрізняються породним складом деревостанів:

ТПП 1 (виділ 8): 10Сз+Бп, чиста культура сосни з домішкою берези (890 шт./га);

ТПП 2 (виділ 9): 10Сз+Бп, чиста культура сосни з домішкою берези (1000 шт./га);

ТПП 3 (виділ 14): 9Сз+1Акб+Бп, сосна з домішкою робінії звичайної (*Robinia pseudoacacia* L.) та берези (1030 шт./га).

На пробних площах проводили суцільний переоблік дерев за породами, ступенями товщини, диференціацію за класами росту і розвитку (класи Крафта) та категоріями санітарного стану. Для характеристики санітарного стану використовувався індекс стану (Іс):

$$I_C = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^{N} k_j \times n_j$$

де: I_C – показник стану; k_j – j-та категорія санітарного стану (від I до VI); n_j – кількість дерев у j-ій категорії санітарного стану; N – загальна кількість дерев на пробній площі.

Відбір зразків ґрунту проводився з горизонту 0–20 см. Вміст гумусу визначали за методом І. В. Тюріна (метод мокрого спалювання), реакцію ґрунтового розчину (pH сольової витяжки) – потенціометричним методом у сольовій витяжці (1 н KCl). Лісовпорядний аналіз охоплював 62 таксаційних виділи на площі 417,8 га станом на 2017 р.

Порівняльний аналіз динаміки деревостанів та ґрунтових умов проводився за матеріалами базових лісовпорядкувань 1977, 1987, 1997 і 2017 рр. Лісова типологія визначалась за методикою типологічного аналізу. Статистичне оцінювання різниці між пробними площами проводилось методом однофакторного дисперсійного аналізу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На землях Шершнівського лісництва, що вийшли з користування після діяльності ІГЗК, починаючи з початку 1970-х рр. було створено лісові культури на площі понад 583 га (9,9% від загальної площі лісництва 5914,3 га). За матеріалами лісовпорядкування 2017 р. проаналізовано 62 таксаційних виділи на площі 417,8 га, що охоплює 72% від загальної площі рекультивованих культур.

Розподіл за типами лісорослинних умов показав переважання бідних борових (А) типів – 63,3% (264,5 га), субори (В) представлені на 33,8% (141,3 га), сугруди (С) – на 2,9% (12,0 га). Домінує свіжий гігротоп (79,8%), сухий – 18,8%. Основна лісоутворювальна порода – сосна звичайна (97,4% площ), вільха чорна представлена на 2,5%, береза повисла та акація біла – по 0,4–0,5%.

Критичним фактором є те, що 279,9 га (67,0% від площ рекультивованих сосняків) уражені осередками кореневої губки. Ці насадження переважно чисті за складом (10Сз), 4–5 класу віку, свіжих борових та суборових типів лісу з відносною повнотою вище 0,8.

Порівняльний аналіз матеріалів чотирьох лісовпорядкувань (1977–2017 рр.) у 39-му кварталі свідчить про суттєву позитивну трансформацію ґрунтових і рослинних умов під впливом лісових насаджень (табл. 1).

Таблиця 1

Динаміка лісівничо-таксаційних показників лісових культур у 39-му кварталі (1977–2017 рр.)

Рік	Площа, га	Склад	Тип лісу	Вік, роки	Висота, м	Бонітет	Повнота	Запас, м³/га
1977	57,8	7Сз2Бп1Влч	A_1С (сухий сосновий бір)	5	1	III	0,90	10
1987	33,0	7Сз2Бп1Влч	A_2С (свіжий сосновий бір)	15	6	I	0,90	60
1997	33,0	8Сз1Бп1Влч	B_2ДС (свіжий дубово-сосновий субір)	25	10	I	0,90	130
2017	13,0	10Сз+Бп+Влч	B_2ДС (свіжий дубово-сосновий субір)	45	17	I	0,80	260

Аналіз даних показав, що вже через 10 років після посадки (1987 р.) відбулась зміна типу лісу з сухого соснового бору (A_1С) на свіжий (A_2С), а клас бонітету підвищився з III до I. Впродовж наступного десятиліття (до 1997 р.) трофотоп зазнав трансформації від борового (А) до суборового (В): тип лісу змінився на свіжий дубово-сосновий субір (B_2ДС), що свідчить про суттєве покращення едафічних умов. Запас деревини за весь 40-річний період збільшився від 10 м³/га до 260–300 м³/га, а клас бонітету стабілізувався на рівні I–Ia. Зі зміною трофотопу у живому надґрунтовому покриві з'явились рослини-індикатори лісових ценозів: зіновать руська, ожика волосиста, верес звичайний, золотушник звичайний.

Результати агрохімічного аналізу ґрунтів на трьох пробних площах у 52-річних насадженнях відображено у таблиці 2.

Таблиця 2

Агрофізичні параметри ґрунту на тимчасових пробних площах (горизонт 0–20 см)

№ п/п	Склад деревостану	Кількість, шт/га	Бонітет	Повнота	Запас, м³/га	Горизонт, см	Гумус, %	pH сол.
1	10Сз+Бп	890	I	0,64	274	0–20	1,32	4,5
2	10Сз+Бп	1000	I	0,71	305	0–20	1,35	4,7
3	9Сз+1Акб+Бп	1030	Ia	0,75	320	0–20	1,50	4,8

Найвищий вміст гумусу (1,50%) зафіксовано на ТПП 3, де у складі деревостану присутня робінія звичайна та підлісок із горобини звичайної (*Sorbus aucuparia* L.) із зімкнутістю 25%. На ТПП 1 і ТПП 2 (чисті сосново-березові насадження) вміст гумусу становив відповідно 1,32 та 1,35%. За абсолютним значенням усі три ділянки належать до групи слабогумусованих ґрунтів (1–2%), проте різниця між ними становить 10–14%.

Реакція ґрунтового середовища (pH сол.) закономірно змінюється зі збільшенням участі листяних порід: від 4,5 на ТПП 1 та 4,7 на ТПП 2 до 4,8 на ТПП 3. Підкислення ґрунту під чистими сосняками є типовою реакцією через утворення хвойного опаду (голок), що повільно мінералізується та продукує органічні кислоти. Введення листяних порід, особливо азотфіксуючої робінії, сприяє нейтралізації ґрунтового середовища та пришвидшенню мінералізації органічних речовин.

Таксаційні показники підтверджують взаємозв'язок між породним складом і ґрунтовими умовами. На ТПП 3 (9Сз+1Акб+Бп) запас деревини склав 320 м³/га при середня зміна запасу 6,1 м³/га, що перевищує відповідні показники ТПП 1 та ТПП 2 на 3,3–14,5%. Відносна повнота на ТПП 3 (0,75) є вищою, ніж на ТПП 1 (0,64) і ТПП 2 (0,71). Ці відмінності підтверджують більш сприятливий ґрунтово-трофічний режим на ділянці зі змішаним складом.

Деревостани на всіх трьох ТПП уражені кореневою губкою (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.). Однак інтенсивність ураження суттєво відрізняється залежно від породного складу. Середній індекс санітарного стану на ТПП 1 становив 3,3, на ТПП 2 – 3,1, на ТПП 3 – 2,6, що є мінімальним значенням і свідчить про вищу стійкість мішаного деревостану.

На ТПП 3 частка дерев без ознак ослаблення (I категорія) та слабо ослаблених (II категорія) становить 28,8 і 27,5%, що суттєво вище, ніж на ТПП 1 (19,4% та 17,2%) та ТПП 2. Найменша частка сухостійних дерев (12,5%) також зафіксована на ТПП 3. Достовірність відмінностей між ТПП 3 і ТПП 1 підтверджена результатами однофакторного дисперсійного аналізу: $F_ф=7,59 > F_{0,95}=3,89$ ($P=0,006$).

Аналіз розподілу дерев за класами Крафта показав, що на ТПП 3 частка дерев, представлених у I–II–III класах (провідні, хорошого і нормального росту), становить 72,6%, тоді як на ТПП 1 і ТПП 2 – лише 53,6% і 51,7% відповідно. Ця закономірність свідчить про більш збалансовану вертикальну структуру деревостану в мішаних насадженнях.

Узагальнені показники впливу різного породного складу насаджень на агрофізичні параметри ґрунту та стан деревостану наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняльна характеристика показників ґрунту і деревостану за породним складом насаджень*

Показник / Фактор	Чисті сосняки (10Сз)	Сосна+Береза (10Сз+Бп)	Сосна+Акація+Береза (9Сз+1Акб+Бп)
Вміст гумусу, %	1,18–1,25	1,32–1,35	1,50
pH сол.	4,2–4,4	4,5–4,7	4,8
Щільність ґрунту, г/см³	Підвищена	Знижена	Найнижча
Запас деревини, м³/га	до 145	274–305	320
Індекс санітарного стану	3,3–3,5	3,1–3,3	2,6
Частка пошкоджених дерев, %	до 75	60–65	≈50

Примітка: побудовано на основі власних досліджень (Турко та ін., 2025)

Отримані результати узгоджуються із загальними закономірностями, встановленими у вітчизняній та зарубіжній науковій літературі. Підвищення вмісту гумусу від 1,32–1,35% (чисті сосняки) до 1,50% (насадження з робінією) корелює з даними Malewski et al. (2023), які встановили, що додавання органічної речовини у вигляді деревних решток листяних порід суттєво підвищує вміст C, N, P та різноманіття ґрунтового мікробіому, наближаючи його до типово лісового.

Зміна pH сол. від 4,5 до 4,8 на ділянках з листяними породами є статистично значущою і свідчить про пом'якшення кислотності ґрунтів. Важливо, що навіть незначна частка листяних порід у складі деревостану (10% робінії на ТПП 3) справляла відчутний меліоративний ефект. Це підтверджує дані А. А. Сірика щодо азотфіксуючої ролі робінії (Сірик, Фучило, 2017) та дослідження М. М. Калініна щодо позитивного впливу берези на ґрунтові умови в мішаних насадженнях (Калінін, 2001).

Трансформація типів лісу від A_1C до $B_2ДС$ впродовж 40-річного спостереження є надзвичайно показовою. Вона відображає реальне покращення трофності ґрунтового середовища – явище, описане рядом закордонних дослідників (Pietrzykowski et al., 2015; Kołodziej et al., 2016). При цьому зміна бонітету з III до I–Ia класу підтверджує, що рекультивовані ґрунти при правильному підборі породного складу здатні забезпечити продуктивність на рівні природних лісових угідь (Vacek et al., 2021).

Нижчий індекс санітарного стану на ТПП 3 (2,6 проти 3,1–3,3) пояснюється кількома механізмами: по-перше, листяні породи розривають кореневі взаємозв'язки між сосновими деревами, ускладнюючи поширення *Heterobasidion annosum*; по-друге, листяний опад активізує мікробіологічні процеси і сприяє формуванню антагоністичних до патогену ґрунтових мікроорганізмів; по-третє, підліск із горобини звичайної забезпечує сприятливий мікроклімат, що також підвищує стійкість дерев.

Слід зазначити, що незважаючи на очевидні переваги змішаних насаджень, усі досліджувані ділянки належать до групи слабогумусованих ґрунтів (вміст гумусу 1–2%). Це підтверджує висновок

огляду літератури: 50 років лісового господарювання недостатньо для повного відновлення агрофізичних властивостей до рівня природних лісових ґрунтів. Для прискорення процесу доцільно застосовувати комплексну біологічну рекультивацію із внесенням органічних матеріалів (деревних решток, компосту кори), що активізує мікробіологічні процеси і наближає властивості ґрунту до лісового типу (Malewski et al., 2023).

ВИСНОВКИ

1. Рекультивовані після видобутку ільменітових руд ґрунти Шершнівського лісництва характеризуються низьким вмістом гумусу (1,32–1,50%) та кислою реакцією середовища (pH сол. 4,5–4,8). Усі ділянки належать до групи слабогумусованих ґрунтів, що свідчить про повільне відновлення органічного профілю після техногенного порушення навіть за 50 років лісової рекультивації.

2. Породний склад насадження суттєво впливає на агрофізичні властивості ґрунту. Введення листяних порід – берези повислої (*Betula pendula* Roth.) та робінії звичайної (*Robinia pseudoacacia* L.) – підвищує вміст гумусу на 10–14% та зменшує кислотність ґрунту на 2–7% порівняно з чистими сосновими монокультурами.

3. Мішані деревостани (9Сз1Акб+Бп) забезпечують вищу продуктивність: запас деревини 320 м³/га та середня зміна запасу 6,1 м³/га, що перевищує показники чистих сосняків на 3,3–14,5%.

4. Лісові насадження спричиняють поступову трансформацію ґрунтово-рослинних умов. Впродовж 40 років (1977–2017 рр.) відбулася зміна типу лісу від сухого соснового бору (A_1C) до свіжого дубово-соснового субору ($B_2ДС$), що свідчить про покращення трофності рекультивованих субстратів під впливом деревостанів.

5. Мішані насадження за участю листяних порід виявляють вищу стійкість до кореневої губки: індекс санітарного стану на ділянці 9Сз1Акб+Бп становив 2,6, тоді як на чистих сосново-березових ділянках – 3,1–3,3 (різниця достовірна при P=0,006).

6. Для лісовідновлення на рекультивованих землях Житомирського Полісся рекомендується уникати створення чистих монокультур сосни звичайної, надаючи перевагу змішаним схемам садіння із введенням берези повислої та робінії звичайної (10–15% від кількості посадкових місць). Це забезпечить покращення едафічних умов та підвищення біологічної стійкості насаджень.

Список джерел

1. Шомко О., Давидова І. Дослідження стану ґрунтів рекультивованих територій після видобування ільменіту на Житомирському Поліссі. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2024. № 331(1). С. 3. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-54

2. Сірик А. А., Фучило Я. Д. Використання Robinia pseudoacacia L. для підвищення родючості бідних ґрунтів. Лісовий журнал. 2017. № 3. С. 12–18.

3. Калінін М. М. Вплив берези повислої на ґрунтові умови у змішаних соснових насадженнях. Науковий вісник УкрДЛТУ. 2001. Вип. 11.2. С. 55–60.

4. Турко В. М., Турко М. В. Зміна агрофізичних показників лісового ґрунту у лісових ділянках Шершнівського лісництва після лісової рекультивації на об'єктах гірничо-добувної діяльності. Лісові екосистеми: сучасні проблеми і перспективи досліджень-2025: матеріали IV Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Житомир, 31 травня 2025 р.). Житомир: ПНУ, 2025. С. 96.

5. Turko V., Siruk Y., Turko M., Antonyukov O. Forest reclaiming in areas disturbed by mining and extraction of ilmenite deposits. Sciences of Europe. 2025. Praha. № 165. P. 3–8.

6. Pietrzykowski M., Krzaklewski W. Selected aspects of reclamation of forest land in the mining regions of Poland. Inzynieria Srodowiska. 2007. No. 12. P. 33–42. DOI: 10.1016/B978-0-12-812986-9.00027-0

7. Pietrzykowski M., Socha J., Doorn N. Scots pine (Pinus sylvestris L.) site index in relation to physico-chemical and biological properties in reclaimed mine soils. New Forests. 2015. Vol. 46. P. 247–266. DOI: https://doi.org/10.1007/s11056-014-9459-z

8. Misebo A., Szostak M., Sierka E., Pietrzykowski M., Woś B. The interactive effect of reclamation scenario and vegetation types on physical parameters of soils developed on carboniferous mine spoil heap. Land Degradation & Development. 2023. Vol. 34. P. 3593–3605. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.4705

9. Kołodziej B., Bryk M., Sowińska-Jurkiewicz A., Otremba K., Gilewska M. Soil physical properties of agriculturally reclaimed area after lignite mine: a case study from central Poland. Soil & Tillage Research. 2016. Vol. 163. P. 54–63. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.001

10. Świątek B., Pietrzykowski M. Soil factors determining the fine-root biomass in soil regeneration after a post-fire and soil reconstruction in reclaimed post-mining sites under different tree species. Catena. 2021. Vol. 204. Art. 105449. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105449

11. Malewski T., Borowik P., Golińska P., Okorski A., Olejarski I., Oszako T. Organic inputs positively alter the bacteriome of post-agricultural soils. Forests. 2023. Vol. 14(9). Art. 1711. DOI: https://doi.org/10.3390/f14091711

12. Spasić M., Vacek O., Vejvodová K., Tejnecký V., Vokurková P., Křížová P., Polák F., Vašát R., Borůvka L., Drábek O. Which trees form the best soil? Reclaimed mine soil properties under 22 tree species: 50 years later – assessment of physical and chemical properties. European Journal of Forest Research. 2023. P. 1–19. DOI: https://doi.org/10.1007/s10342-023-01637-x

13. Klamerus-Iwan A., Behan P., Słowik-Opoka E., Delgado-Moreira M., Reyna-Bowen L. Soil hydrological properties and organic matter content in Douglas-fir and spruce stands: Implications for forest resilience to climate change. Forests. 2025. Vol. 16(8). Art. 1217. DOI: https://doi.org/10.3390/f16081217

14. Rahmonov O., Krzysztofik R., Środek D., Smolarek-Lach J. Vegetation and environmental changes on non-reclaimed spoil heaps in Southern Poland. Biology. 2020. Vol. 9(7). Art. 164. DOI: https://doi.org/10.3390/biology9070164

15. Vacek Z., Linda R., Cukor J., Vacek S., Šimůnek V., Gallo J., Vančura K. Scots pine (Pinus sylvestris L.) – the suitable pioneer species for afforestation of reclamation sites? Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 485. Art. 118951. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118951

16. Bradshaw A. D. Restoration of mined lands – using natural processes. Ecological Engineering. 1997. Vol. 8. P. 255–269.

17. Frouz J. Soil Biota and Ecosystem Development in Post Mining Sites. Boca Raton: CRC Press, 2013. 314 p.

18. Pretzsch H., del Río M., Ammer C. Mixed-Species Forests: Ecology and Management. Berlin: Springer, 2017. 653 p.