

Charakterystyka wybranych właściwości fizykochemicznych i biologicznych gleb w dominujących typach zbiorowisk roślinnych – rejon olkuski

Paweł KAPUSTA¹, Grażyna SZAREK-ŁUKASZEWSKA¹, Rolf D. VOGT²

¹*Institut Botaniki im. W. Szafera Polskiej Akademii Nauk, 31-512 Kraków, ul. Lubicz 46, e-mail: p.kapusta@botany.pl; g.szarek-lukaszewska@botany.pl*

²*University of Oslo, Department of Chemistry, 0316 Oslo, Postbox 1033 Blindern, e-mail: r.d.vogt@kjemi.uio.no*

Wstęp

W ostatnim półwieczu na terenach górniczych Olkusza, Bolesławia i Bukowna, znajdujących się między Katowicami a Krakowem w południowej Polsce, wykonano wiele ekspertyz gleboznawczych (np. Gruszczyński i in. 1990; Kucharski i Marchwińska 1990; Trafas i in. 1990; Verner i in. 1996; Krzaklewski i in. 2004; Niklińska i in. 2005; Pasieczna i Lis 2008; Cabala i in. 2009a). Niemal zawsze ich priorytetem była ocena stopnia skażenia podłoża metalami ciężkimi. Badania te były (i nadal są) ważne z kilku powodów. Po pierwsze, wiedza na temat lokalizacji miejsc wydobycia rudy i składowania materiałów odpadowych jest niepełna. Dokumentacja sięga zaledwie kilkudziesięciu lat wstecz i często nie obejmuje stanowisk historycznej eksploatacji i przeróbki kruszców (o wieku przekraczającym 100 lat), po których pozostało niewiele śladów w krajobrazie. Po drugie, metale ciężkie mogą być przenoszone na duże odległości, poza teren działalności górniczej, i dostawać się do gleb wraz z pyłem pochodzącym z produkcji hutniczej i erozji eolicznej odpadów górniczych w ilościach

trudnych do oszacowania. Po trzecie, okolice Olkusza cechują się dużym zagęszczeniem ludności, w związku z czym spora część populacji jest narażona na skutki oddziaływania metali ciężkich zakumulowanych w środowisku. Jest to problem realny, ponieważ, pomimo łatwego dostępu do informacji o poziomie skażenia gleby i zaleceń odnośnie do sposobu jej zagospodarowania, niektóre grunty, np. w obrębie przydomowych ogródków, wciąż wykorzystuje się pod uprawę owoców i warzyw. Powszechne jest też zbieranie runa leśnego na nieużytkach przemysłowych.

Najstarsze i obecnie trudnodostępne opracowania dotyczące wpływu działalności przemysłowej na gleby rejonu olkuskiego pochodzą z lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku (Trafas i in. 1990; por. znajdujący się tam wykaz literatury). Ich zakres obejmuje rozpoznanie wielkości, zasięgu i zmienności przestrzennej skażenia oraz ocenę związanego z nim ryzyka środowiskowego. Początkowo interesowano się przede wszystkim glebami uprawnymi z uwagi na ich duży udział powierzchniowy, a także możliwość bezpośredniego oddziaływania na zdrowie ludzi poprzez

produkcję roślin jadalnych. Badania prowadzone niezależnie przez różne służby i ośrodki naukowe dostarczyły wiarygodnych danych na temat skażenia i dały wyobrażenie o skali problemu. Grunty rolne gmin związanych z przemysłem górniczym (Olkusz, Bukowno, Sławków i Klucze – według ówczesnego podziału administracyjnego), zajmujące blisko 13 000 ha, prawie w całości charakteryzowały się wysokim, ponadnormatywnym nagromadzeniem kadmu, ołowiu i cynku (Kucharski i Marchwińska 1990), wykluczającym dotychczasowy sposób użytkowania. Największe stężenia metali ciężkich w glebie odnotowano w pobliżu Kombinatu Górniczo-Hutniczego Bolesław (obecnie Zakłady Górniczo-Hutnicze Bolesław w Bukownie), który jest głównym w regionie emitorem zanieczyszczeń gazowo-pyłowych. Dla tego terenu ustanowiono strefę ochronną z zakazem osiedlania się i prowadzenia działalności rolniczej w jej obrębie, natomiast dla terenów mniej skażonych opracowano projekt ich zagospodarowania.

Z początkiem lat dziewięćdziesiątych badania zaczęły koncentrować się na obszarach najsilniej przekształconych i stały się bardziej szczegółowe. Między innymi podejmowano problem erozji eolicznej stawów osadowych odpadów poflotacyjnych i związanej z tym emisji pyłu bogatego w metale ciężkie, który stanowi dodatkowy czynnik degradacji gleb w rejonie olkuskim (np. Krzaklewski i Pietrzykowski 2002; Krzaklewski i in. 2004). Uwagę kierowano także na tereny w przeszłości niebadane lub badane rzadko, w tym na tereny leśne i zurbanizowane oraz na nieużytki przemysłowe (np. Cabala i Teper 2007; Cabala i in. 2008). Analizowano już nie tylko zawartość metali ciężkich w podłożu, ale także ich pochodzenie, drogi migracji, biodostępność i powiązania z innymi składnikami gleby (np. Cabala i in. 2009b, 2010). W ten nurt wpisują się badania prowadzone w latach 2008–2011 w ramach projektu MF EOG PL0265 pt. „Roślinność gleb galmanowych i jej znaczenie dla zachowania różnorodności biotycznej i krajobrazowej terenów pogórniczych”. Ich celem była pełna charakterystyka warunków edaficznych panujących w szeroko rozumianym terenie górniczym (obejmującym obszar zdegradowany geomechanicznie i/lub chemicznie). Zgromadzone dane, prezentowane w niniejszym rozdziale,

stały się podstawą w wyjaśnianiu zmienności składu i bogactwa gatunkowego unikatowych zbiorowisk roślinnych formujących się spontanicznie bądź z udziałem człowieka na siedliskach metalonolnych (jeden z głównych celów projektu; Kapusta i Godzik – Rozdział 6, niniejszy tom). Dzięki temu, iż w badaniach uwzględniony został duży obszar oraz wszystkie dominujące typy podłoża, typy użytkowania terenu i typy pokrywy roślinnej, powstała możliwość weryfikacji danych zebranych w przeszłości oraz porównania stanowisk dotychczas badanych osobno, w różnym czasie i przez różnych autorów. Po raz pierwszy dla tego obszaru gleby analizowano nie tylko pod kątem ich właściwości fizycznych i chemicznych, ale także pod kątem właściwości biologicznych (aktywności mikroorganizmów i mezofauny glebowej) i w powiązaniu z cechami zbiorowisk roślinnych (bogactwem i składem gatunkowym roślin).

Materiały i metody

Badaniami glebowymi objęto obszar, który ze względu na typ użytkowania można podzielić na 3 główne kategorie: 1) nieużytki górnicze, tj. tereny przekształcone w wyniku odkrywkowej eksploatacji i przeróbki rud metali (zwały odpadów kopalnianych i popłuczkowych oraz wyrobiska wypełnione tymi odpadami, zazwyczaj rekultywowane) z glebami o charakterze inicjalnym, 2) tereny porolne, nieużytkowane z powodu zanieczyszczenia, z glebami brunatnymi, 3) tereny leśne z bielcami. Stałe powierzchnie badawcze (N=49) reprezentują każdą z wymienionych wyżej kategorii. W kategorii pierwszej znalazły się zbiorowiska roślinne występujące na odpadzie górniczym, tj. murawy galmanowe (GW, N=7), murawy z dominacją *Molinia caerulea* (MW, N=6) oraz lasy sosnowe (FW, N=6). W kategorii drugiej znalazły się zbiorowiska roślinne występujące na podłożu piaszczystym, na dawnych glebach uprawnych, tj. ciepłolubne murawy z dominacją *Festuca ovina* (GS, N=7) i murawy o charakterze mezofilnym (P, N=8). Kategoria trzecia obejmowała lasy sosnowe na glebie piaszczystej (FS, N=15) (Kapusta i Godzik – Rozdział 6, niniejszy tom).

Próby gleby, które stały się podstawą charakterystyki badanych siedlisk, zostały zebrane z jednego

z 9 poletek założonych w obrębie powierzchni badawczych. Najczęściej było to poletko środkowe (Kapusta i Godzik – Rozdział 6, niniejszy tom). Glebę pobierano za pomocą metalowej łopatką z 3 płytkich (o głębokości do 50 cm) odkrywek, z dwóch lub trzech poziomów genetycznych (tam, gdzie to było możliwe). Ponieważ poziom organiczny O był słabo reprezentowany w badanych siedliskach, nie brano go pod uwagę; tam, gdzie występował, usuwano go delikatnie przed poborem próby. W przeważającej liczbie przypadków próby pochodziły z poziomu próchnicznego (zwykle A, Ap lub AB) i następującego po nim poziomu wzbogacania (zwykle AB, B), rzadziej natomiast z poziomu wymywania (E, AE) gleb bielcowych. Starano się pobierać glebę z całej miąższości danego poziomu. Glebę z odkrywek łączono w jedną próbę (dla każdego poziomu genetycznego) reprezentującą daną powierzchnię badawczą (w ilości około 1 kg). Ograniczono w ten sposób zmienność wynikającą z heterogeniczności środowiska glebowego. Z każdej powierzchni badawczej, ze wszystkich 9 poletek, zebrano dodatkowe próby gleby przeznaczone do analizy aktywności mezofauny glebowej. Próby te pobrano z górnej warstwy gleby (po usunięciu ściółki, tj. podpoziomu Ol, o ile występował) za pomocą próbnika o przekroju 3,5 cm, do głębokości 13 cm. Próby gleby transportowano do laboratorium w polietylenowych woreczkach i przechowywano w obniżonej temperaturze (około 5°C) do czasu analizy.

Analizę właściwości fizycznych i chemicznych wykonano w próbach gleby wysuszonych powietrznie i przesianych przez sito o oczkach 2 mm. W próbach tych oznaczano skład granulometryczny, odczyn (pH) oraz stężenia węgla (C), azotu (N), siarki (S), fosforu (P), potasu (K), wapnia (Ca), magnezu (Mg), żelaza (Fe), manganu (Mn), kadmu (Cd), ołowiu (Pb) i cynku (Zn). Skład granulometryczny gleby (procentowy udział frakcji piasku, pyłu i łu) określano, stosując metodę przesiewania i sedymentacji (ISO11277, 2009). Pomiar odczynu gleby wykonano w zawiesinie wodnej (ISO10390, 1994) przy pomocy pehametru Mettler Toledo MO 125. Zawartość całkowitego i organicznego C oraz całkowitej S określano techniką suchego spalania (ISO10694, 1995) na analizatorze LECO SC-144DRPC, a stężenie całkowitego N – metodą

Kjeldahla (ISO11261, 1995) na aparacie Kjeltec 2300 firmy Foss Tecator. Stężenia całkowite P, całkowite i frakcji wymiennej K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cd, Pb i Zn, a także frakcji rozpuszczonej w wodzie Zn, Cd i Pb określano metodą płomieniowej absorpcyjnej spektrometrii atomowej (F-AAS) na spektrofotometrze Varian 220 FS. Stężenia całkowite oznaczano w próbach gleby mineralizowanych w stężonym kwasie HClO₄. Stężenia frakcji wymiennej i rozpuszczonej w wodzie analizowano w roztworze uzyskanym po ekstrakcji gleby 1 mol roztworem BaCl₂ (ISO11260, 1994) oraz wodą dejonizowaną. Zawartość biodostępnego fosforu (P) określano kolorymetrycznie (Hach Lange DR 3800) w roztworze uzyskanym po ekstrakcji gleby wodorowęglanem sodu (Olsen i in. 1954).

Próby przeznaczone do oceny aktywności mezofauny glebowej były analizowane w losowej kolejności. Zwierzęta wyplaszano z gleby metodą mokrych lejków (O'Connor 1955). Dzięki ogrzewaniu gleby lampami czas wyplaszania skrócono do 5 godzin. Metoda stosowana jest standardowo do ekstrakcji wazonkowców (*Enchytraeidae*), niemniej może służyć także do zgrubnej, względnej oceny aktywności innych grup drobnych, mobilnych bezkręgowców glebowych, np. nicieni (*Nematoda*) czy niesporczaków (*Tardigrada*). Wypłoszone zwierzęta liczono pod mikroskopem binokularowym. Dane uzyskane z 9 poletek uśredniano, uzyskując wartości reprezentujące powierzchnie badawcze.

Przed analizą statystyczną zmienne transformowano za pomocą funkcji logarytmicznej lub eksponencjalnej i skalowano do zakresu 0–1, aby otrzymać normalne lub przynajmniej symetryczne rozkłady wartości i homogeniczną wariancję (Økland 2007). W celu porównania średnich wartości zmiennych pomiędzy kategoriami siedliskowymi (6 kategorii: GW, GS, FW, FS, MW, P) przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA; w analizie tej użyto danych uzyskanych dla górnego poziomu glebowego ze wszystkich powierzchni badawczych (N=49). Dwuczynnikowa analiza wariancji ANOVA z powtarzanymi pomiarami posłużyła do oszacowania istotności efektu użytkowania terenu (3 kategorie: nieużytki górnicze, teren porolny, teren leśny) i poziomu glebowego (dwa poziomy genetyczne: próchniczny

i następujący po nim), oraz efektu interakcji tych czynników. W analizie uwzględniono tylko te powierzchnie badawcze ($N=40$), dla których istniał komplet danych (tj. analizowano przynajmniej 2 poziomy glebowe) oraz, które można było jednoznacznie zaklasyfikować do jednej z 3 kategorii użytkowania terenu. Analizę czynnikową przeprowadzono dla wybranych parametrów fizycznych i chemicznych górnej warstwy gleby (dla których transformacja odniosła pozytywny skutek) w celu określenia struktury wzajemnych powiązań między tymi parametrami. Przy wyodrębnianiu głównych składowych dokonano rotacji struktury czynnikowej metodą *varimax*, natomiast przy określaniu liczby czynników przyjęto kryterium Kaisera (wartość własna >1). Wyodrębnione czynniki posłużyły jako zmienne wyjaśniające w analizie regresji wielorakiej przeprowadzonej dla parametrów biologicznych gleby i parametrów zbiorowisk roślinnych (składu i bogactwa gatunkowego roślin warstwy zielnej). Skład gatunkowy roślin reprezentowały zmienne uzyskane w nietendencyjnej analizie zgodności DCA (Detrended Correspondence Analysis) identyfikujące główne gradienty ekologiczne decydujące o rozmieszczeniu roślin (oś DCA 1 i DCA 2). W analizie tej uwzględniono gatunki występujące na co najmniej 10% stanowisk. Analizy statystyczne wykonano przy pomocy oprogramowania STATISTICA 9, natomiast analizę DCA – przy pomocy CANOCO 4.5.

Wyniki i dyskusja

Większość parametrów glebowych charakteryzowała się dużą zmiennością, zarówno pomiędzy kategoriami siedliskowymi, jak i w obrębie tych kategorii (współczynnik zmienności często przekraczał 100%). Do zmiennych o wartościach najbardziej zróżnicowanych należały całkowite stężenia metali ciężkich, całkowite stężenia niektórych pierwiastków odżywczych (np. N, Ca, Mg) oraz stężenia wymiennych form metali (Tabela 1). Wyniki te są zrozumiałe, ponieważ do badań wybrano siedliska silnie kontrastujące ze sobą, a powierzchnie badawcze, nawet w obrębie tej samej kategorii siedliskowej, mogły się od siebie różnić pod wieloma względami, np. rodzajem odpadu górniczego, odległością od źródeł zanieczyszczeń

pyłowych (huty, stawów osadowych) czy czasem tworzenia się gleby.

Analiza chemiczna pokazała, że gleby badanych powierzchni są skrajnie zanieczyszczone. Najwyższe całkowite stężenia metali ciężkich odnotowano na powierzchniach założonych na odpadzie górniczym. Wynosiły one 506 mg kg^{-1} Cd (powierzchnia GW), $33\,178 \text{ mg kg}^{-1}$ Pb (MW) i $72\,089 \text{ mg kg}^{-1}$ Zn (GW). W przypadku najczystszych powierzchni (FS) stężenia te były o dwa lub trzy rzędy wielkości niższe od wartości maksymalnych (odpowiednio 2 mg kg^{-1} Cd, 93 mg kg^{-1} Pb i 132 mg kg^{-1} Zn). Mieściły się one jednak w zakresie stężeń uznanych w Dyrektywie 86/278/EWG Rady Europejskiej za progowe dla gleb, tj. maksymalnie dopuszczalne: $1\text{--}3 \text{ mg kg}^{-1}$ dla Cd, $50\text{--}300 \text{ mg kg}^{-1}$ dla Pb i $150\text{--}300 \text{ mg kg}^{-1}$ dla Zn (Anonymous 1986). Oznacza to, że zdecydowaną większość pomiarów, tj. znajdujących się powyżej dolnego kwartyla, należy traktować jako przekroczenia normy (Tabela 1).

Uzyskane wyniki pokrywają się w zupełności z danymi podawanymi przez innych autorów. Verner i in. (1996) prowadzili badania glebowe w pobliżu Zakładów Górniczo-Hutniczych Bolesław (ZGH Bolesław), częściowo na stanowiskach podobnych do opisywanych w niniejszym rozdziale (próby pobierali między innymi w obrębie dawnych gruntów uprawnych). Analizowana przez tych autorów gleba w większości przypadków zawierała bardzo wysokie, ponadnormatywne ilości metali ciężkich (wartość mediany dla stężeń całkowitych zmierzonych w górnej warstwie gleby wynosiła $14,8 \text{ mg kg}^{-1}$ Cd, 545 mg kg^{-1} Pb i 2175 mg kg^{-1} Zn). Cabala i in. (2009a) objęli badaniami nieco inny teren, ale również znajdujący się w okolicy ZGH Bolesław. Powierzchnie badawcze wytyczono w rejonie wydobycia rudy, w miejscu składowania odpadów (co odpowiada kategoriom GW, FW i/lub MW) oraz na obszarze zanieczyszczonym jedynie poprzez opad pyłu z powietrza (prawdopodobnie kategoria FS). Podawane przez tych autorów zakresy stężeń całkowitych Cd, Pb i Zn (odpowiednio: $2\text{--}220 \text{ mg kg}^{-1}$, $172\text{--}8262 \text{ mg kg}^{-1}$ i $378\text{--}55\,506 \text{ mg kg}^{-1}$) zasadniczo nie różnią się (rzędem wielkości) od prezentowanych w Tabeli 1. Teren odpowiadający powierzchniom FS badali również Krzaklewski i in. (2004) w ramach oceny oddziaływania stawów osadowych na otoczenie (emisja

pyłu). Uzyskane w ramach tych badań wyniki były zbieżne z przedstawianymi w niniejszym rozdziale. Ustalenia dotyczące poziomu zanieczyszczenia gleb w terenie eksploatacji górniczej, dokonane niezależnie przez różnych autorów (w tym cytowanych powyżej), pozytywnie weryfikowane są przez szersze opracowania glebowe, które ukazały się w ostatnim czasie (Pasiczna i Lis 2008; Fabijańczyk i Zawadzki 2012; Zawadzki i Fabijańczyk 2013).

Odpad górniczy (skała płonna) jest mieszaniną dolomitu, kalcytu i innych minerałów (Cabala i Teper 2007). Tworzące się na nim gleby zawierają duże ilości pierwiastków odżywczych, takich jak K, Ca i Mg. Charakteryzują się one stosunkowo wysokim odczynem, a także mają korzystniejsze proporcje frakcji ilastej do pozostałych frakcji glebowych w porównaniu z glebami piaszczystymi. Takie cechy sprzyjają utrzymywaniu metali ciężkich w formach nierozpuszczalnych, trudno dostępnych dla organizmów żywych (Ernst 1996; van Gestel 2008; Smolders i in. 2009). Dlatego pomimo dużego obciążenia metalami ciężkimi odpad górniczy może oferować relatywnie dobre warunki dla rozwoju roślin (Grodzińska i in. 2010; Szarek-Łukaszevska i Grodzińska 2011) oraz mikroflory (Stefanowicz – Rozdział 14, niniejszy tom) i fauny glebowej. Potwierdza to wielu autorów, w tym badaczy roślinności terenów cynkowo-olowiowych, którzy jako wyznacznika toksyczności gleby używają stosunku Pb/Ca lub Zn/Ca (pośrednio niosącego informację o dostępności Pb i Zn) zamiast całkowitej zawartości metali ciężkich (Brown i Brinkmann 1992; Brown 1994). Opiswane w niniejszym rozdziale gleby powierzchni badawczych GW, FW i MW cechowały się bardzo wysoką zawartością metali ciężkich, jednak niewielka część tych metali występowała w formach rozpuszczalnych w wodzie i wymiennych (Tabela 2). W efekcie, niektóre powierzchnie piaszczyste cechowały się wyższą względną biodostępnością metali ciężkich (wyrażoną jako stosunek form mobilnych do całkowitych) niż powierzchnie z odpadem górniczym. Biorąc pod uwagę dodatkowe czynniki, jak zawartość materii organicznej i pierwiastków odżywczych (Tabela 2), powierzchnie piaszczyste na nieużytkach górniczych (zwłaszcza GS) należy ocenić jako najbardziej nieprzyjazne dla organizmów żywych. Wyniki badań nad aktywnością

biologiczną gleby oraz roślinnością pokazują, że tak jest w istocie (Grodzińska i in. 2010; Szarek-Łukaszevska i Grodzińska 2011; Stefanowicz – Rozdział 14, niniejszy tom). Powierzchnie GW, MW i FW są miejscem występowania bogatych w gatunki zbiorowisk roślinnych oraz stosunkowo obfitych (jak na teren silnie zanieczyszczony) zespołów bezkręgowców glebowych (wazonkowców, nicieni i niesporczaków; Tabela 2). Pod tym względem przewyższają je jedynie zbiorowiska dawnych pól (P), z glebami dość żyznymi, ale zanieczyszczonymi poprzez depozycję atmosferyczną. W przeciwieństwie do powyższych powierzchni GS i FS cechują się niską aktywnością biologiczną gleby i ubogim zestawem gatunków roślin (w skrajnych przypadkach na badanych poletkach występuje tylko jeden gatunek – *Festuca ovina*).

Opisywane do tej pory cechy odnosiły się tylko do górnej mineralnej warstwy gleby (poziom próchnicy). Analiza warstw położonych głębiej pozwala lepiej zrozumieć genezę i charakter gleb w okolicach Olkusza. Gleby na odpadzie górniczym (przede wszystkim powierzchni GW i FW) mają charakter inicjalny. Ich historia obejmuje na ogół kilkadziesiąt lat od momentu zwałowania odpadu do dnia dzisiejszego. Poziom próchnicy jest słabo wykształcony i zwykle nie przekracza 10 cm. Zawiera on mniej metali ciężkich niż poziom leżący poniżej (Tabela 3). Innymi słowy, główne źródło skażenia stanowi skała macierzysta (w tym wypadku odpad górniczy). Jeśli chodzi o pozostałe gleby, sytuacja jest najczęściej (ale nie zawsze) odwrotna, czego dowodzi istotna interakcja kategorii użytkowania terenu i poziomu gleby (Tabela 3). Poziom próchnicy, o znacznie większej miąższości, cechuje się wyższymi koncentracjami metali ciężkich niż poziom następujący bezpośrednio po nim. Źródłem zanieczyszczenia są tu pyły pochodzące głównie z emisji z huty oraz erozji eolicznej stawów osadowych i zwałowisk, które akumulują się w górnych warstwach profilu glebowego (skała macierzysta pierwotnie była prawdopodobnie niezanieczyszczona). O poziomie zanieczyszczenia tych gleb decyduwać mogą takie czynniki jak odległość od emitorów czy pokrywa roślinna (drzewa) ograniczająca rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń oraz ich osiadanie na powierzchni gleby. Lasy (FS) znajdujące się w większości na obrzeżach terenu objętego

badaniami są znacznie mniej obciążone metalami ciężkimi niż dawne pola uprawne (GS) zlokalizowane w sąsiedztwie huty (Tabela 2).

Siedliska muraw (GS i P) na porzuconych terenach rolnych pod wieloma względami różnią się od siebie (porównaj: właściwości fizyczne i chemiczne gleby, aktywność biologiczną, bogactwo gatunkowe roślin; Tabela 2). O zaliczeniu ich do wspólnej kategorii użytkowania terenu (tereny porolne) na potrzeby analizy poziomów glebowych zdecydowały archiwalne dane (mapy) dotyczące typu gleb i użytkowania terenu w latach siedemdziesiątych XX wieku wokół ZGH Bolesław. Według tych danych powierzchnie GS i P były polami uprawnymi położonymi na glebach brunatnych. Potwierdzeniem tego są cechy poziomu próchniczego, który można określić jako poziom orny (Ap), homogenny i wyraźnie odgraniczający się od poziomu położonego niżej oraz wyższa niż w przypadku pozostałych powierzchni zawartość dostępnego fosforu i dość wysoka zawartość fosforu całkowitego (Tabela 2), co świadczy o wcześniejszym nawożeniu.

Osobną kategorię siedliskową i zarazem kategorię użytkowania terenu stanowią lasy gospodarcze (bory sosnowe) na piaskach (FS). Odstają one od pozostałych powierzchni badawczych, głównie ze względu na niższy odczyn gleby (Tabela 2). Odczyn ten byłby zapewne jeszcze niższy, zbliżony do tego, jaki panuje w glebie pod typowym drzewostanem sosnowym, gdyby nie wpływ pyłów alkalicznych pochodzących z emisji huty i wietrzenia odpadów poflotacyjnych. Metale ciężkie, dopływające do gleby wraz z pyłami w zetknięciu z kwaśnym roztworem glebowym, stają się bardziej mobilne (potencjalnie bardziej biodostępne). Widać to szczególnie dobrze w przypadku Pb, którego stężenie form wymienionych w glebach leśnych FS jest podwyższone w stosunku do gleb pozostałych powierzchni badawczych (Tabela 2). Co więcej, jest ono wyższe w poziomie wzbogacania niż w położonym nad nim poziomie próchnicznym. Świadczyć to może o intensywnym przenikaniu Pb, ale także Cd i Zn, w głąb profilu glebowego (Tabela 3).

Analiza czynnikowa (wykonana dla zmienionych, dla których udało się uzyskać na drodze transformacji rozkład normalny) zredukowała 25 właściwości fizycznych i chemicznych gleby do

5 czynników o przejrzystej strukturze wyjaśniających łącznie prawie 80% zmienności zbioru danych (Tabela 4). Pierwszy czynnik odpowiada za 28% zmienności; odzwierciedla on całkowitą zawartość trzech głównych metali ciężkich (Cd, Pb, Zn) i innych pierwiastków związanych z rudami (Fe, S) i skałą płonną (K, Ca, Mg, C). Z czynnikiem tym dodatnio skorelowany jest odczyn (pH). Czynnikiem 2 (19% zmienności) reprezentuje zasobność gleby w pierwiastki odżywcze, tj. całkowity C (i skorelowany z nim węgiel organiczny) i N oraz wymienny K, Ca i Mg. Czynnikiem 3 (13% zmienności) charakteryzuje skład granulometryczny gleby i powiązana z nim zawartość P (całkowitego i dostępnego). Ostatnie dwa czynniki, 4 (11% zmienności) i 5 (9% zmienności), odnoszą się do stężenia rozpuszczalnych w wodzie i wymiennych form metali ciężkich.

Otrzymane w analizie czynniki są całkowicie niezależne od siebie (występuje pomiędzy nimi zerowa korelacja), dlatego zostały użyte w analizie regresji wielorakiej (zamiast oryginalnych zmiennych) do wykrycia zależności istniejących pomiędzy właściwościami fizycznymi i chemicznymi gleby a jej niektórymi parametrami biologicznymi (pominięto parametry mikrobiologiczne, których zmienność szczegółowo analizowano w rozdziale 14 niniejszego tomu) oraz parametrami zbiorowisk roślinnych. W analizie tej skład gatunkowy roślin reprezentowały dwie pierwsze osie DCA, które przedstawiono w postaci diagramu na Rycinie 1. Wyniki regresji wielorakiej zawiera Tabela 5. Czynnikiem 1 (mówiący o obecności/zawartości odpadu górniczego w podłożu) silnie wpływa na bogactwo i skład gatunkowy roślinności. Brak spodziewanego negatywnego związku między tym czynnikiem a zmiennymi zależnymi wynika prawdopodobnie z faktu, iż stężenia całkowite metali ciężkich są słabym wskaźnikiem toksyczności środowiska (Smolders i in. 2009). Większe znaczenie dla roślin mają prawdopodobnie inne towarzyszące metalom ciężkim pierwiastki, jak Ca, Mg, K, C i S. Niekorzystny wpływ Cd, Pb i Zn na ekosystem istnieje, ale ujawnia się dopiero w warunkach sprzyjających występowaniu metali w formach reaktywnych, tj. rozpuszczalnych w wodzie i wymiennych. Świadczą o tym negatywne zależności pomiędzy czynnikiem 5 a liczebnością wazonkowców i niesporczaków oraz liczbą

gatunków roślin. Wynik ten, w świetle bogatej literatury dotyczącej efektów oddziaływania metali ciężkich na organizmy żywe (np. Bååth 1989; Didden i Römbke 2001; Dazy i in. 2009), nie jest zaskakujący. Brak reakcji nicieni na zanieczyszczenie gleby także ma swoje wytłumaczenie. Nicienie są grupą bezkręgowców o zróżnicowanych strategiach ekologicznych i funkcji, jaką pełnią w sieci troficznej. Różnią się też znacznie wrażliwością na czynniki stresu, w tym na zanieczyszczenie środowiska (Georgieva i in. 2002; Pen-Mouratov i in. 2008). Wysoka zawartość metali ciężkich w glebie z pewnością eliminuje niektóre gatunki nicieni, ale jednocześnie może sprzyjać innym (np. dzięki ograniczaniu konkurencji), skutkując nieistotnym związkiem pomiędzy parametrami ilościowymi zespołu nicieni a poziomem zanieczyszczenia.

To, że metale ciężkie stanowią w badanym terenie główny czynnik determinujący jakość gleby, a tym samym strukturę zespołów organizmów glebowych i zbiorowisk roślinnych, wynika nie tylko z opisywanych wyżej negatywnych zależności. Cennych informacji na temat stanu środowiska glebowego dostarczają dodatkowo porównania parametrów mierzonych w rejonie Olkusza z parametrami cechującymi czyste siedliska. Dla przykładu, zagęszczenie wazonkowców (które przyjmuje się za dobry wskaźnik degradacji i zanieczyszczenia gleb) (Didden i Römbke 2001) w lasach iglastych na terenie Polski mieści się w zakresie od 10 000 do 60 000 osobników na metr kwadratowy (Kapusta i in. 2003). Wartości, które uzyskano w niniejszym projekcie, na powierzchniach borów sosnowych (FS), były około 10-krotnie niższe. Wynik ten można uznać za wiarygodny, jest on bowiem zbliżony z ustaleniami innych autorów (Tosza i in. 2010). Świadczy on o znacznej degradacji gleb w rejonie olkuskim.

Wnioski

- Gleby w okolicach Olkusza (w rejonie działalności górniczej) charakteryzują się dużą zmiennością własności fizycznych i chemicznych zarówno pomiędzy kategoriami siedliskowymi (nieużytki górnicze, tereny porolne, tereny leśne) jak i w obrębie tych kategorii. Wynika to z różnic w składzie mineralnym (za które odpowiada przede wszystkim obecność odpadu górniczego w podłożu), odległości od źródeł zanieczyszczeń pyłowych (huty, stawów osadowych) i zaawansowania procesu glebotwórczego.

- Gleby w rejonie olkuskim są skrajnie zanieczyszczone metalami ciężkimi. Największą zawartością Cd, Pb i Zn cechują się gleby powstałe na odpadzie górniczym, najmniejszą – piaszczyste gleby leśne.

- Istotnym źródłem metali ciężkich jest nie tylko odpad górniczy, ale także pyły pochodzące z emisji hutniczych oraz z erozji eolicznej stawów osadowych i zwałowisk.

- Gleby powstałe na odpadzie górniczym, pomimo tego, że zawierają najwięcej metali ciężkich, oferują lepsze warunki dla rozwoju roślin i fauny glebowej niż gleby piaszczyste. Wynika to z wysokiej zawartości niektórych makroelementów (np. K, Ca, Mg, C) i obniżonej biodostępności metali ciężkich.

- O aktywności mezofauny glebowej (liczebności wazonkowców i niesporczaków) i bogactwie gatunkowym roślin decyduje w większym stopniu biodostępność metali ciężkich niż ich całkowita zawartość.

- Zagęszczenie wazonkowców, które przyjmuje się za dobry wskaźnik degradacji i zanieczyszczenia gleb, jest 10-krotnie niższe w rejonie olkuskim niż w czystych rejonach Polski.