

Agnieszka Klimkowicz-Pawlas

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

ŚRODOWISKOWE I ZDROWOTNE SKUTKI ZANIECZYSZCZENIA GLEB ORAZ METODY PRZECIWDZIAŁANIA*

Słowa kluczowe: zanieczyszczenia, drogi narażenia, zdrowie człowieka, nowo pojawiające się zanieczyszczenia, czynniki wpływające na efekty zdrowotne, przeciwdziałanie

Wstęp

Zdrowe gleby użytkowane rolniczo są kluczowym elementem do osiągnięcia celów Europejskiego Zielonego Ładu, tj. neutralności klimatycznej, przywrócenia różnorodności biologicznej, zdrowych i zrównoważonych systemów żywnościowych oraz odpornego środowiska. Jednak gleby często są zagrożone zanieczyszczeniem spowodowanym działalnością antropogeniczną, które według Międzyrządowego Panelu Technicznego ds. Gleb (ITPS) jest trzecim najistotniejszym zagrożeniem dla funkcji gleb w Europie (21). W dotychczasowych badaniach bardzo dużo uwagi poświęcano analizie środowiskowych skutków zanieczyszczenia gleb, tj. zmian, jakie zachodzą w ekosystemach glebowych, ich jakości i bioróżnorodności. Należy również pamiętać, iż stan środowiska glebowego ma istotny (negatywny lub pozytywny) wpływ na zdrowie i jakość życia ludzi (5). Negatywny wpływ degradacji gleb (również zanieczyszczenia) na zdrowie człowieka można przypisać pogorszeniu szeregu usług ekosystemowych świadczonych przez glebę, jak: dostarczanie żywności, sekwestracja dwutlenku węgla, dostępność wody, obieg składników pokarmowych, co przekłada się na pogorszenie jakości życia (40). Negatywny wpływ wynika również z bezpośredniego narażenia na działanie wielu różnych substancji chemicznych, często występujących w małych stężeniach, których skumulowane skutki są widoczne dopiero po długim okresie narażenia. Światowa Organizacja Zdrowia podaje, iż jedna czwarta chorób, z którymi borykają się ludzie obecnie, jest spowodowana długotrwałym narażeniem na zanieczyszczenia, z czego 70% stanowią choroby nieza-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.2 pt. „Gleby użytkowane rolniczo” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2021 r.

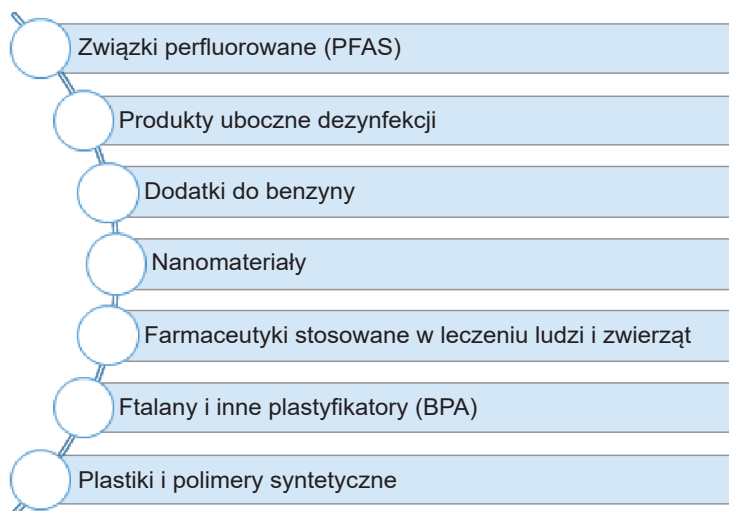
każne, takie jak nowotwory, choroby serca i płuc, cukrzyca czy choroby nerek (44). Zanieczyszczenia mogą zaburzać gospodarkę hormonalną, wpływać rakotwórczo, neurotoksycznie lub teratogennie, mogą również wywoływać stres oksydacyjny w komórkach i powodować produkcję białek stresowych (23). Według danych Komisji *Lancet* ds. zdrowia i zanieczyszczenia, w 2015 r. zanieczyszczenie środowiska było przyczyną około 9 mln przedwczesnych zgonów na świecie (44), a Europejska Agencja Ochrony Środowiska podaje, że zanieczyszczenia są przyczyną co ósme-go zgonu w Unii Europejskiej (13). Nadmierne uwalnianie do środowiska niektórych zanieczyszczeń (np. antybiotyków) skutkuje nabywaniem odporności na środki przeciwdrobnoustrojowe (66). Jednym z założeń Europejskiego Zielonego Ładu jest dążenie do osiągnięcia zerowego poziomu emisji zanieczyszczeń do roku 2050, co wiąże się ze stopniowym ograniczaniem ilości produkowanych odpadów oraz uwalniania do środowiska substancji szkodliwych, m.in. pestycydów, antybiotyków i mikroplastików (13). Celem opracowania jest analiza skutków środowiskowych i zdrowotnych związanych z obecnością różnych grup zanieczyszczeń w środowisku glebowym oraz wskazanie sposobów zmniejszenia ryzyka dla zdrowia.

Rodzaje zanieczyszczeń i ich źródła

Substancje chemiczne zanieczyszczające środowisko glebowe i stanowiące potencjalne zagrożenie dla środowiska i zdrowia ludzi można podzielić na organiczne i nieorganiczne. Najpowszechniej występującymi nieorganicznymi zanieczyszczeniami gleby są pierwiastki śladowe, takie jak: arsen (As), kadm (Cd), chrom (Cr), miedź (Cu), rtęć (Hg), ołów (Pb), mangan (Mn), nikiel (Ni), cynk (Zn) oraz radionuklidy (23). Pierwiastki takie jak: bor (B), Cu, Cr, Zn, molibden (Mo), selen (Se) są niezbędne do prawidłowego przebiegu procesów metabolicznych, natomiast Pb, Cd, Hg nie pełnią żadnych funkcji fizjologicznych i są toksyczne dla organizmów żywych i człowieka (76). Do najważniejszych zanieczyszczeń organicznych zalicza się substancje ropopochodne, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), związki chloroorganiczne (OCP, ang. *organochlorine pesticides*), dioksyne, polichlorowane difenyle (PCB) oraz pestycydy obejmujące różne grupy substancji (88, 23). Zanieczyszczenia organiczne pochodzą głównie ze źródeł antropogenicznych, a jedynie w niewielkim stopniu są uwalniane do środowiska z procesów naturalnych, takich jak pożary czy erupcje wulkanów (88, 76). Niektóre z tych substancji były lub są produkowane do określonych zastosowań w rolnictwie (jako pestycydy, np. dichlorodifenylotrichloroetan (DDT), dieldryna, heksachlorobenzen, heksachloroheksan (HCH)) lub w przemyśle (jako chemikalia czy półprodukty, np. PCB, benzen, toluen) (23). Część zanieczyszczeń organicznych (OCP, dioksyne, PCB, WWA, związki perfluorowane) zaliczana jest do trwałych zanieczyszczeń organicznych (ang. *Persistent Organic Pollutants*); są to substancje odporne na degradację chemiczną i biologiczną, wykazujące potencjał do przenoszenia na dalekie odległości, zdolność do akumulowania w tkance tłuszczowej organizmów żywych i przechodzenia do łańcucha pokarmowego człowieka (75, 76). Ze względu na trwałość i potencjalną

toksyczność substancje te objęte są postanowieniami Konwencji sztokholmskiej w sprawie trwałych zanieczyszczeń organicznych (92), która wprowadza ograniczenia dotyczące ich wykorzystania, transportu oraz nakłada obowiązek ich eliminacji z produkcji.

Dużym wyzwaniem w ocenie zagrożenia dla środowiska oraz zdrowia ludzi są obecnie tzw. nowo pojawiające się zanieczyszczenia (EC, ang. *emerging contaminants*) (rys. 1).

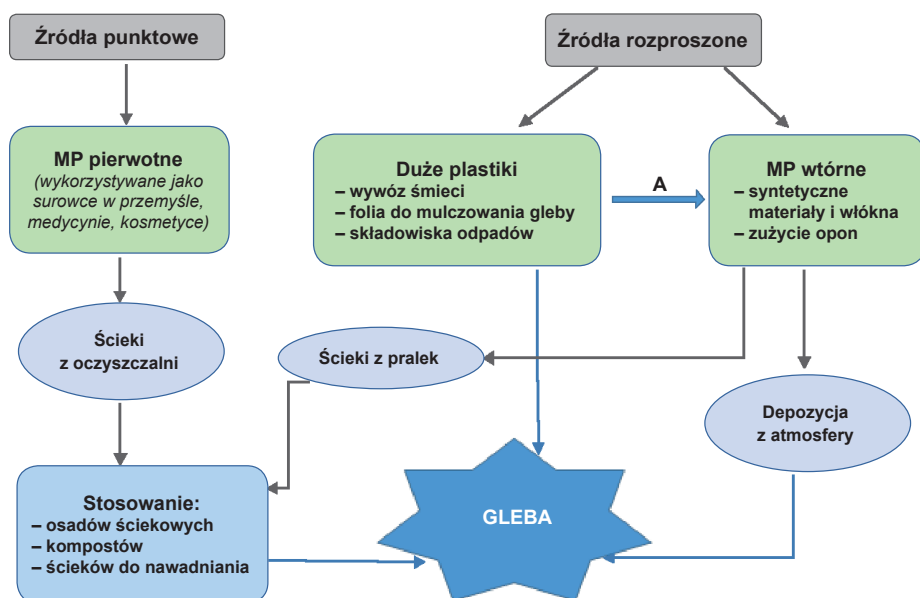


Rys. 1. Przykłady nowo pojawiających się zanieczyszczeń

Źródło: opracowanie własne na podstawie Geissen i in., 2015 (28), Gavrilescu i in., 2015 (27), FAO i UNEP, 2021 (23)

Jest to szeroka i zróżnicowana grupa związków chemicznych, głównie pochodzenia syntetycznego, organicznych i nieorganicznych, obejmująca ponad 20 grup substancji, z których najpowszechniej występują: związki perfluorowane (PFAS), farmaceutyki (pozostałości leków weterynaryjnych oraz antybiotyków), ftalany i inne plastyfikatory (np. bisfenol A – BPA), pozostałości środków do dezynfekcji, sztuczne nanomateriały, pierwiastki ziem rzadkich oraz plastiki i polimery syntetyczne (16, 23, 27, 28, 46). Substancje te występują we wszystkich elementach środowiska (wody, powietrze, gleby) (28), charakteryzują się dużą trwałością oraz zdolnością do bioakumulacji, mogą być toksyczne dla organizmów glebowych (100, 32) i prawdopodobnie szkodliwe dla człowieka (16, 33, 59). Niektóre z tych zanieczyszczeń ze względu na trwałość w środowisku (np. PFAS) objęte są postanowieniami Konwencji sztokholmskiej (92). Szczególną uwagę zwraca się ostatnio na obecność w glebach związków perfluorowanych (16, 59, 91) oraz mikro- i nanoplastików (98, 17, 32, 73, 98, 100, 101). Substancje perfluoroalkilowe (PFAS) są związkami wysoce trwałymi i stabilnymi w środowisku, o dużym potencjale do bioakumulacji i transportu na duże odległości

(61, 49, 59). Związki te były produkowane od lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku i szeroko stosowane w gospodarstwach domowych i przemyśle, m.in. w piankach przeciwpożarowych, naczyniach kuchennych o nieprzywierającej powierzchni, opakowaniach do żywności oraz tkaninach wodoodpornych i ognioodpornych (59). PFAS pochodzą głównie ze składowisk odpadów, terenów przemysłowych, oczyszczalni ścieków oraz obszarów, w których miały miejsce duże pożary lub przeprowadzano szkolenia przeciwpożarowe (49). Kolejną istotną ze środowiskowego punktu widzenia grupą zanieczyszczeń gleby są mikro- i nanoplastiki (45, 73, 74). Są to trwałe tworzywa syntetyczne o wielkości mniejszej niż 5 mm lub 100 nm, występujące w różnych formach morfologicznych, np. w postaci kulek, fragmentów folii lub włókien (33, 100, 101). Głównym źródłem mikroplastików w glebie są składowiska odpadów oraz działalność rolnicza związana ze stosowaniem kompostów i nawozów organicznych, osadów ściekowych, ścieków do nawadniania oraz folii polietylenowych do mulczowania gleby (23, 32, 33) (rys. 2). W osadach ściekowych najczęściej występują: polietylen, polipropylen, polichlorek winylu i polistyren (101). Ponadto źródłem mikroplastików jest również ścieranie opon samochodowych, spływy z dróg asfaltowych i depozycja atmosferyczna (101). Zanieczyszczenia te mogą być pobierane przez organizmy glebowe, przenoszone przez łańcuch żywnościowy i mogą stwarzać potencjalne ryzyko dla zdrowia człowieka (33). Mikroplastiki mogą być również wektorami hydrofobowych zanieczyszczeń organicznych, tj.: PCBs, OCP, WWA, a także metali, tj.: Ni, Zn, Cd i Pb (17, 32, 98, 100, 101).



Rys. 2. Źródła zanieczyszczenia gleb mikroplastikami (MP);

A – degradacja fizyczna, biologiczna oraz pobieranie przez organizmy

Źródło: opracowanie własne na podstawie Guo i in., 2020 (32)

Zanieczyszczenie gleby może mieć charakter lokalny lub rozproszony. Rozproszone zanieczyszczenie gleby nie ma pojedynczego lub łatwego do zidentyfikowania źródła i zwykle obejmuje duże obszary (21, 65). Najważniejszym źródłem zanieczyszczeń rozproszonych na terenach rolniczych jest długotrwałe stosowanie niskiej jakości nawozów mineralnych zawierających zanieczyszczenia, niekontrolowane aplikowanie osadów ściekowych, intensywne stosowanie pestycydów oraz obornika zawierającego np. pozostałości leków weterynaryjnych (21, 41, 76). Istotnym źródłem zanieczyszczenia gleb jest daleki transport zanieczyszczeń zawieszonych na drobnych cząstkach pyłów (które osadzają się na roślinach, a następnie wraz z resztkami roślinnymi wprowadzane są do gleb) oraz procesy zalewowe i erozyjne (ulegające nasileniu wskutek występowania ekstremalnych warunków pogodowych) (3, 76).

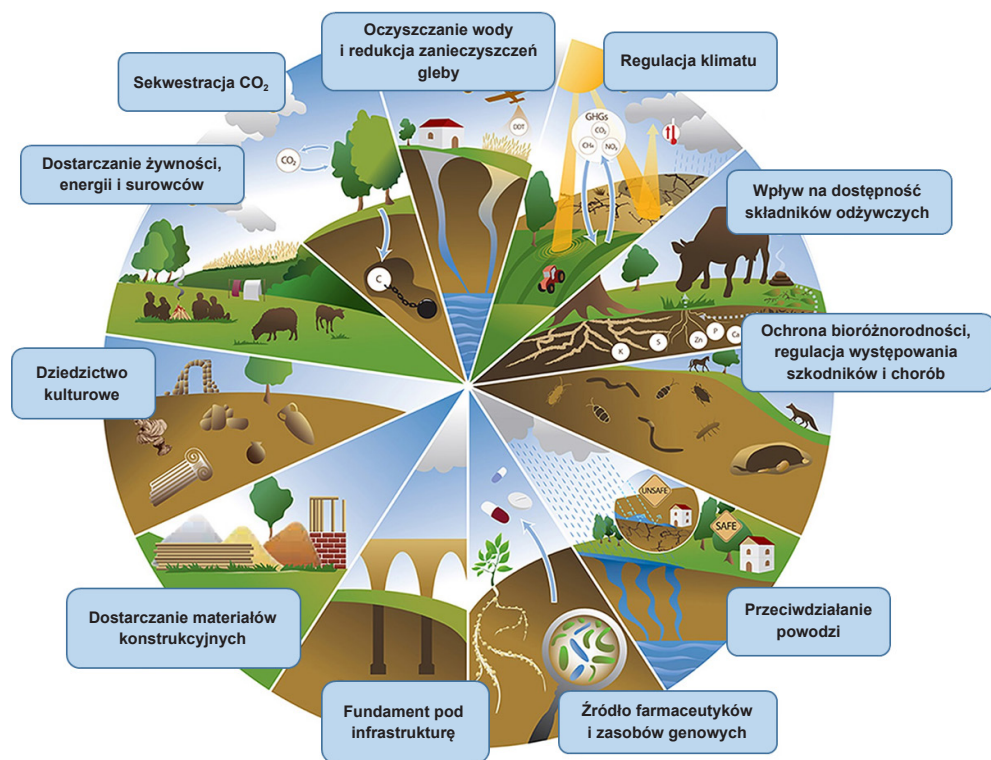
Zanieczyszczenia gleby o charakterze lokalnym dotyczą niewielkich powierzchni, a ich występowanie wiąże się najczęściej z intensywną działalnością przemysłową, nieodpowiednim składowaniem i przetwarzaniem odpadów oraz wydobywaniem i przetwórstwem kopalin (m.in. rud metali) (76). Zagrożenia zanieczyszczeniami o charakterze punktowym dotyczą głównie terenów przemysłowych i poprzemysłowych, zurbanizowanych oraz obszarów w pobliżu tras transportowych i składowisk odpadów (65). Duże ilości odpadów i intensywne stosowanie chemikaliów w ciągu ostatnich dziesięcioleci doprowadziły do powstania licznych zanieczyszczonych miejsc w całej Europie. Miejsca te są ważnymi źródłami zanieczyszczeń i mogą stanowić znaczące zagrożenie dla ekosystemu i zdrowia człowieka (76). Szacuje się (23), że w Europie około 2,8 mln obszarów to tereny potencjalnie zanieczyszczone, z czego zidentyfikowano i objęto działaniami około 650 tysięcy obszarów.

Poza substancjami chemicznymi gleby mogą być również źródłem patogennych drobnoustrojów (5, 6) oraz genów oporności na antybiotyki (ARG, ang. *antibiotic resistance genes*) (8, 12, 42, 43, 66). Źródłem patogenów (*Escherichia coli*, *Salmonella* sp., *Shigella* sp., nicienie, pasożyty) mogą być: skażona woda, odchody zwierząt lub ludzi, a także odpady komunalne i kliniczne (6, 103). Głównym źródłem zanieczyszczenia gleb lekoopornymi bakteriami (ARB, ang. *antibiotic resistant bacteria*) oraz ARG są ścieki z komunalnych i szpitalnych oczyszczalni ścieków, osady ściekowe i nawozy organiczne (np. obornik lub pomiot kurzy) pochodzące z intensywnej hodowli zwierzęcej, gdzie antybiotyki stosowane są w celach leczniczych lub jako stymulatory wzrostu (8, 12, 39, 52, 66).

Środowiskowe skutki zanieczyszczenia gleb

Zdrowie człowieka jest zazwyczaj definiowane przez lekarzy i społeczeństwo jako brak choroby (78), natomiast w szerszym kontekście zdrowie człowieka to „stan pełnego fizycznego, psychicznego i społecznego dobrostanu, a nie tylko brak choroby lub stan niedomagania organizmu” (96). Według Brevika i in. (7), gleba ma istotny wpływ na stan zdrowia i jakość życia ludzi, a wpływ ten może zaznaczać się w sposób bezpośredni lub pośredni. Gleby są powiązane z szerokim zakresem usług

ekosystemowych, m.in. wspierających zdrowie człowieka (rys. 3). Obejmują one usługi: zaopatrzeniowe (dostarczanie żywności, wody, drewna, włókien, surowców i fizycznego wsparcia dla infrastruktury); regulacyjne (łagodzenie skutków powodzi, filtrowanie składników odżywczych i zanieczyszczeń, magazynowanie dwutlenku węgla i regulacja emisji gazów cieplarnianych, detoksykacja i recykling odpadów, regulacja populacji szkodników i chorób); kulturowe (rekreacja, korzyści estetyczne i duchowe) oraz wspomagające, takie jak obieg składników odżywczych (5, 55, 103).



Rys. 3. Główne usługi ekosystemowe gleb

Źródło: FAO ikonografiki, zmodyfikowane (104)

Negatywny wpływ degradacji gleb (również zanieczyszczenia) na zdrowie człowieka można przypisać pogorszeniu szeregu usług ekosystemowych świadczonych przez glebę, jak: dostarczanie żywności, sekwestracja dwutlenku węgla, dostępność wody, obieg składników pokarmowych, co przekłada się na pogorszenie jakości życia (23, 40, 76).

Zanieczyszczenie gleby jest jednym z głównych czynników wpływających na obniżenie lub/i utratę różnorodności biologicznej gleby (60, 62). Zanieczyszczenia (metale, WWA, pestycydy, antybiotyki, mikroplastiki itp.) mogą wpływać toksycznie

na organizmy glebowe, powodując zmiany w ich biomacie, liczebności, aktywności enzymatycznej i metabolicznej oraz w strukturze zbiorowisk (15, 23, 58). Częstym bezpośrednim skutkiem oddziaływania zanieczyszczeń na organizmy glebowe jest obniżenie tempa wzrostu i reprodukcji, skrócenie cyklu życiowego oraz śmiertelność (101). Natomiast długotrwałe narażenie na niskie stężenia substancji zanieczyszczających glebę może prowadzić do wytworzenia strategii adaptacyjnych oraz zastępowania gatunków wrażliwych gatunkami bardziej odpornymi na zanieczyszczenia (23). Gleba jest również naturalnym źródłem leków: antybiotyków i innych środków farmaceutycznych (6). Z drugiej jednak strony nadmierne stosowanie antybiotyków w medycynie i weterynarii może powodować rozprzestrzenianie się w środowisku genów oporności na antybiotyki (43, 66). Dochodzi do tego w wyniku spontanicznych mutacji, przejęcia genów oporności na antybiotyki (ARG) od innych bakterii na drodze horyzontalnego transferu genów lub poprzez zakażenie bakteriofagami (6), co prowadzi do zmian w całej społeczności mikroorganizmów (76). Potencjalne przenoszenie ARG z bakterii środowiskowych na patogeny ludzkie może istotnie zmniejszyć skuteczność antybiotyków, stwarzając poważne zagrożenie dla zdrowia publicznego (8, 12, 66). Do najczęściej wykrywanych w glebie należą geny związane z opornością na tetracykliny (*tet*), erytromycynę (*erm*) i sulfonamidy (*sul*) (12, 39, 48, 66). Zaobserwowano również, że narażenie na niektóre pierwiastki śladowe może wywoływać odporność u mikroorganizmów glebowych, a także promować oporność na środki przeciwdrobnoustrojowe (29).

Zmiany w aktywności biologicznej gleby prowadzą do obniżenia tempa rozkładu ściółki i świeżej materii organicznej, wpływając na cykle biogeochemiczne na zanieczyszczonych obszarach, co w efekcie skutkuje zmniejszeniem zawartości węgla organicznego oraz dostępności składników odżywczych (45, 74, 85, 100). Według Wag g i in. (93), zmiany w strukturze zbiorowisk mikroorganizmów glebowych mogą prowadzić do zaburzeń przemian fosforu i azotu, co przekłada się na nadmierne wymywanie składników do wód gruntowych lub prowadzi do emisji gazów cieplarnianych, takich jak tlenki azotu. Utrata glebowej materii organicznej oraz zmniejszenie aktywności organizmów glebowych prowadzi również do pogorszenia fizycznej jakości gleb oraz zwiększenia ich podatności na procesy erozji (23). Fizyczna struktura gleby może ulec degradacji na skutek obecności w niej zanieczyszczeń, np. mikroplastików, nanomateriałów lub substancji ropopochodnych. Obserwowano zmiany w takich parametrach, jak: rozkład wielkości porów, pojemność wodna, gęstość objętościowa gleby oraz stabilność agregatów glebowych (32, 101). Mikroplastiki obecne w glebie mogą adsorbować inne zanieczyszczenia organiczne (np. pestycydy, WWA) lub metale, ale mogą również stanowić mikrosiedlisko dla mikroorganizmów glebowych (33).

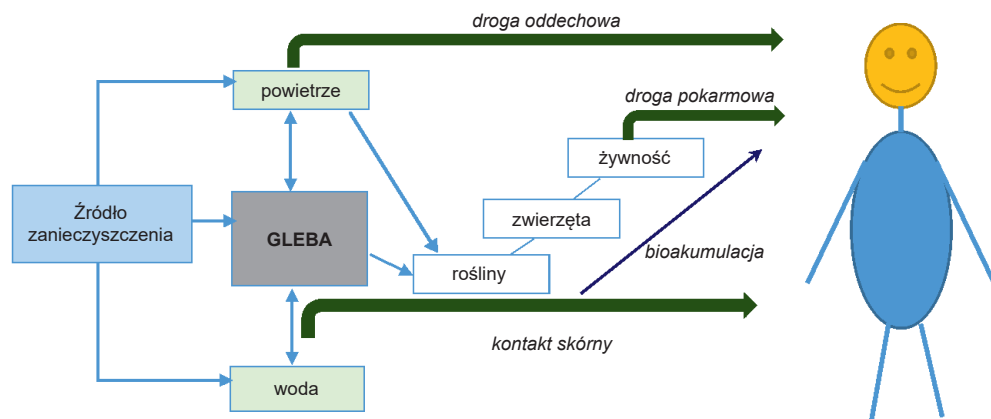
Jedną z głównych funkcji ekologicznych pełnionych przez glebę jest filtrowanie, buforowanie i przekształcanie zanieczyszczeń nieorganicznych i organicznych, co zapewnia dobrą jakość wód gruntowych i bezpieczną produkcję żywności, a w konsekwencji ochronę zdrowia ludzi. Głównymi czynnikami decydującymi o zatrzymywa-

niu i losach zanieczyszczeń w glebie oraz ich pobieraniu przez rośliny i oddziaływaniu na organizmy są procesy sorpcji i desorpcji (76). Pogarszanie się właściwości gleby decydujących o retencji zanieczyszczeń (pH, materii organicznej, frakcji koloidalnej) ogranicza zdolności filtracyjne gleby, co może prowadzić do nadmiernego uwalniania zanieczyszczeń lub składników odżywczych do wód podziemnych i powierzchniowych lub łańcucha pokarmowego (4) oraz stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi.

Zanieczyszczenie gleby wpływa na obniżenie wielkości plonowania i pogorszenie jakości produkowanej żywności, a tym samym na ekonomikę rolnictwa i dochody rolników (23) oraz bezpieczeństwo żywnościowe (21). Szacuje się, że zanieczyszczenie gleby jest odpowiedzialne za utratę produktywności rolnej w wysokości 15–25%. Poważne zanieczyszczenie gleby prowadzi do degradacji gruntów i braku możliwości wykorzystania ich do celów produkcyjnych, mieszkaniowych i rekreacyjnych, co ostatecznie przyczynia się do porzucania gruntów i spadku wartości terenów przyległych (23). Konsekwencją zanieczyszczenia gleb i obniżenia bioróżnorodności może być ograniczenie dostępu do terenów zielonych i rekreacyjnych (5). Badania Sandi fera i in. (78) wykazały, że już krótkotrwałe przebywanie w lasach lub parkach miejskich zmniejsza stres i objawy depresyjne, poprawia samoocenę i nastrój, wpływa więc pozytywnie na zdrowie człowieka.

Drogi narażenia

Narażenie człowieka na działanie substancji zanieczyszczających glebę odbywa się kilkoma potencjalnymi drogami, a znaczenie każdej z nich różni się w zależności od rodzaju zanieczyszczenia, właściwości gleby, rodzaju receptora oraz warunków i działalności prowadzonej na danym terenie (10, 76). Główne drogi narażenia to droga pokarmowa, oddechowa oraz dermalna (rys. 4). Narażenie drogą pokarmową może być wynikiem celowego spożywania gleby, określanego jako geofagia (82) lub przypadkowego spożycia zanieczyszczonej żywności, wody, gleby lub pyłu (85). Szacuje się, że dzienne spożycie gleby na skutek geofagii może się wahać od 5 do 70 g i średnio wynosi około 50 g (23). Jednak główną drogą przedostawania się zanieczyszczeń gleby do organizmu człowieka (ponad 90%) jest spożycie żywności zarówno pochodzenia roślinnego (np. warzyw), jak i zwierzęcego (np. mięso i produkty mleczne), która uległa skażeniu na skutek bioakumulacji zanieczyszczeń lub osadzania się pyłów z atmosfery (76, 90, 103). W ten sposób mogą być wprowadzane do organizmu człowieka pierwiastki śladowe, radionuklidy, zanieczyszczenia organiczne (np. pestycydy czy WWA) oraz bakterie odporne na środki przeciwdrobnoustrojowe (23).



Rys. 4. Główne drogi narażenia człowieka na zanieczyszczenia

Źródło: opracowanie własne na podstawie Swartjes i Cornelis, 2011 (90) oraz FAO i UNEP, 2021 (23)

Narażenie drogą oddechową ma mniejsze znaczenie, wiąże się z wdychaniem pyłu pochodzącego z gleby (3, 50, 83, 102) oraz lotnych (np. benzen, toluen, etylobenzen, ksylen – BTEX) i średnio lotnych (np. pestycydy, WWA, polibromowane etery difenyłowe (PBDEs)) związków organicznych (2, 9, 23, 85) i jest często związane z narażeniem zawodowym, m.in. rolników (opary agrochemikaliów), czy też pracowników składowisk odpadów i przedsiębiorstw zajmujących się usuwaniem zanieczyszczeń. Niektóre z zanieczyszczeń (pestycydy, plastyfikatory, pierwiastki śladowe) mogą przenikać naturalną barierę, jaką jest skóra (droga dermalna) i wnikać do organizmu człowieka (23, 90, 103). Narażenie człowieka na zanieczyszczenia może być również wynikiem wtórnego zanieczyszczenia zasobów wodnych oraz osadzania się zanieczyszczeń z powietrza (76).

Metody oceny wpływu zanieczyszczenia gleb na zdrowie człowieka

W analizie skutków zdrowotnych narażenia człowieka na zanieczyszczenia wykorzystuje się dwa podejścia: klasyczne toksykologiczne bazujące na szacowaniu ryzyka zdrowotnego (89) oraz epidemiologiczne, w którym analizuje się rzeczywiste skutki zdrowotne w populacji (35). Analiza ryzyka zdrowotnego obejmuje: gromadzenie dostępnych danych o poziomie zanieczyszczenia gleb, ich źródłach i rodzajach; szacowanie dawki pobranej (CDI, ang. *Chemical Daily Intake*); określenie zależności dawka–efekt poprzez porównanie CDI z wartościami referencyjnymi (ang. *Reference Dose*, *Reference Concentration*) (11, 50, 71, 90). Do oceny narażenia człowieka na zanieczyszczenia gleb wykorzystuje się zróżnicowane modele

narażenia, np. CSOIL stosowany jest w Holandii (11), CLEA w Wielkiej Brytanii (37), a RISKNET we Włoszech. Szersza analiza i charakterystyka modeli stosowanych w Europie zawarta jest w opracowaniu Hoeka i in. (35). Metody analizy ryzyka zdrowotnego dotyczą najczęściej oceny pojedynczego zanieczyszczenia, co może prowadzić do niedoszacowania rzeczywistego ryzyka, ponieważ człowiek jest narażony na oddziaływanie mieszanin wielu zanieczyszczeń. Ponadto metody te nie uwzględniają interakcji pomiędzy chemicznymi i środowiskowymi czynnikami stresowymi, a wynik takiej oceny zależy od dostępnych danych toksykologicznych, które wymagają często stosowania arbitralnych współczynników bezpieczeństwa (35, 89). Druga metoda oceny skutków zdrowotnych polega na przeprowadzeniu badań epidemiologicznych w celu analizy związku pomiędzy narażeniem a rzeczywistym stanem zdrowia bezpośrednio w dotkniętej populacji mieszkańców (35). Analiza przeprowadzona na potrzeby realizacji projektu Soils4EU realizowanego w IUNG-PIB (40) wykazała, że większość dostępnych danych na temat skutków epidemiologicznych spowodowanych zanieczyszczeniem gleby pochodzi z prac naukowych. W tego typu badaniach w ocenie narażenia najczęściej wykorzystywane są badania biomonitoringowe (HBM, ang. *Human Biomonitoring*) polegające na analizie zawartości zanieczyszczeń w płynach ustrojowych, takich jak krew (9, 18, 34, 53), mocz (47, 64) czy mleko karmiących matek (30) lub w tkankach, np. paznokciach, włosach lub tkance skórnej (67). Rzadziej natomiast wykorzystuje się w tym celu analizy oparte na modelowaniu (19, 35, 69). Natomiast najczęściej badane skutki zdrowotne to: współczynniki śmiertelności i zachorowalności (1, 14, 68), liczba hospitalizacji, występowanie nowotworów (24, 51, 57, 94) oraz wad wrodzonych u dzieci (53). Wszystkie dostępne badania epidemiologiczne oparte są na okresowo gromadzonych danych statystycznych i rejestrach hospitalizacji (1, 35, 69). Badania epidemiologiczne skutków zanieczyszczenia gleb również nie zawsze dają jednoznaczną informację o związkach pomiędzy zanieczyszczeniem a zdrowiem człowieka ze względu na pewne ograniczenia, które były wskazywane przez samych autorów, jak: brak ilościowych wskaźników narażenia populacji (14), występowanie tzw. czynników zakłócających, np. współistnienie innych chorób czy palenie papierosów (24) lub uwzględnianie w badaniach głównie osób dorosłych (51, 68).

Potencjalne skutki zdrowotne zanieczyszczenia gleb

Skutki zdrowotne powodowane przez zanieczyszczenia można podzielić na miejscowe – związane z działaniem na określone narządy (np. płuca, skórę, jelita, wątrobę i nerki) w miejscu kontaktu lub spożycia oraz ogólnoustrojowe – wynikające z wchłonięcia i rozprowadzenia zanieczyszczeń w organizmie człowieka poprzez krążenie ogólnoustrojowe. Efekty zdrowotne są wynikiem różnych mechanizmów oddziaływania zanieczyszczeń na organizm człowieka (tab. 1). Substancje takie jak: arsen, bisfenol A, dioksyne, WWA, PCBs, ftalany, niektóre pestycydy (DDT,

HCH) oraz PBDEs wykazują wpływ na gospodarkę hormonalną i określane są jako *endocrine disruptors* (EDs). Ich szkodliwy wpływ wynika z budowy chemicznej podobnej do hormonów, dzięki czemu mogą działać jak hormony i zastępować je w receptorach, powodując zmiany w ich prawidłowym działaniu, syntezie i metabolizmie (9, 16, 77, 80). Niektóre zanieczyszczenia (pierwiastki: Cr, Cd, Ni, Co oraz WWA) mogą być genotoksyczne i mutagenne, powodują uszkodzenia informacji genetycznej w komórce poprzez zmiany w chromosomach lub DNA oraz mutacje genów (75, 87). Najczęstsze efekty zdrowotne wynikające z genotoksyczności i mutagenności zanieczyszczeń to: występowanie nowotworów, przyspieszone starzenie się, zaburzenia immunologiczne, choroby układu krążenia i neurodegeneracyjne, a także poronienia, bezpłodność czy wady wrodzone u dzieci (23, 75). Działanie teratogenne zanieczyszczeń związane jest z ich wpływem na rozwój płodu w okresie prenatalnym, czego efektem mogą być wady rozwojowe, opóźnienie wzrostu, zaburzenia rozwoju neurologicznego, zaburzenia funkcjonalne, a nawet śmierć prenatalna (75). Za teratogenne zanieczyszczenia występujące w glebie uważa się PCB, pestycydy, rozpuszczalniki, ołów oraz rtęć organiczną (20). O neurotoksyczności mówimy wówczas, kiedy narażenie na substancje chemiczne powoduje negatywne zmiany w strukturze i/lub normalnej aktywności układu nerwowego. Neurotoksyczne oddziaływanie wykazuje szereg zanieczyszczeń, m.in. As, Pb, Hg, PCB, pestycydy chloroorganiczne, PBDEs, WWA, ftalany oraz BPA, a najczęściej obserwowane skutki zdrowotne to: autyzm, zaburzenia z deficytem uwagi, niepełnosprawność intelektualna i obniżone IQ lub porażenie mózgowe (38, 56, 72, 79).

Tabela 1

Potencjalne skutki zdrowotne powodowane przez wybrane zanieczyszczenia

Zanieczyszczenie	Efekty zdrowotne	Literatura
Pierwiastki śladowe		
Cd	rak piersi, zaburzenia hormonalne (wpływ na hormony tarczycy), niewydolność jajników u kobiet, choroby nerek	Filippini i in. 2020 (25) Di Nisio i Foresta 2019 (16) Pan i in. 2021 (64) WHO 2013 (97)
Metale (Co, Cu, Sn)	ADHD	Li i in. 2020 (47)
As	zaburzenia gospodarki hormonalnej, nowotwory, choroby układu krążenia, zmiany neurologiczne, hematologiczne i immunologiczne	FAO i UNEP 2021 (23) Kaur i in. 2021 (38) Rahman i in. 2020 (72) Naidu i in. 2021 (60)
Pb	teratogeny (wady wrodzone), neurotoksyczność, choroby układu krążenia, choroby nerek	FAO i UNEP 2021 (23) Kaur i in. 2021 (38) Rahman i in. 2020 (72) Landrigan i in. 2018 (44) WHO 2013 (97) Naidu i in. 2021 (60)

cd. tab. 1

Zanieczyszczenie	Efekty zdrowotne	Literatura
Zanieczyszczenia organiczne		
Lotne związki organiczne (BTEX)	zmiany hematologiczne (anemia, leukemia), rakotwórczość, wpływ na układ oddechowy (astma)	FAO i UNEP 2021 (23) IARC 2021 (36)
Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA)	działanie genotoksyczne i mutagenne, wpływ na układ hormonalny (działanie estrogenne i antyestrogenne), stany zapalne, nowotwory gruczołu sutkowego; rak płuc, pęcherza moczowego i skóry, choroby układu krążenia, cukrzyca, zaburzenia układu odpornościowego	Rodgers i in. 2018 (75) Sun i in. 2020 (87) Roslund i in. 2019 (77) FAO i UNEP 2021 (23) Naidu i in. 2021 (60)
Pestycydy chloroorganiczne (DDT, DDE, HCB, lindan, dieldryna, aldryna, toksafen, mirex i HCB)	zakłócanie równowagi i gospodarki hormonalnej, działanie estrogenne i antyandrogenne u mężczyzn, neurotoksyczność, chłoniak nieziarniczy, rak jądra, rak piersi	Bornman i in. 2018 (9) Rodgers i in. 2018 (75) Qu i in. 2019 (71) FAO i UNEP 2021 (23) Mir i in. 2020 (56)
Pestycydy (chlorpyrifos, paration, malation, atrazyna)	neurotoksyczność, nowotwory sutka, astma, alergie, zaburzenia płodności, wady prenatalne, objawy neurologiczne	Rahman i in. 2020 (72) Rodgers i in. 2018 (75) FAO i UNEP 2021 (23)
Dioksyny	nowotwory u kobiet, rak piersi, mięsak tkanek miękkich, chłoniak nieziarniczy, immunotoksyczność, teratogenne (wady rozwojowe), wpływ na gospodarkę hormonalną	Warner i in. 2011 (94) Rodgers i in. 2018 (75) FAO i UNEP 2021 (23) Naidu i in. 2021 (60)
Polichlorowane difenyle (PCB)	zaburzenia endokrynologiczne (aktywność pseudoestrogenowa i antyestrogenowa, powiększenie tarczycy oraz zmiany w produkcji hormonów – niedoczynność lub nadczynność tarczycy), immunotoksyczność, chłoniak nieziarniczy, czerniak złośliwy, rak piersi	Rodgers i in. 2018 (75) Egorova i Buzmakov 2020 (20) Donato i in. 2008 (18) Maifredi i in. 2011 (51)
Emerging contaminants		
Związki perfluorowane (PFAS, PFOA, PFOS)	zaburzenia hormonalne (choroby tarczycy, zmiany poziomu hormonów tarczycy), rakotwórcze (rak piersi), obniżenie płodności u kobiet (PFOS i PFOA), zaburzenia funkcji rozrodczych u mężczyzn, zaburzenia metabolizmu tłuszczów, choroby układu krążenia, otyłość, nadciśnienie, hepatotoksyczność	Dzierlenga i in. 2020 (19) Steenland i in. 2010 (84) Tsai i in. 2020 (91) Di Nisio i Foresta 2019 (16) Lei i in. 2015 (46) FAO i UNEP 2021 (23) Naidu i in. 2020 (59)
Związki polibromowane (PBDEs)	zaburzenia hormonalne (choroby tarczycy) neurotoksyczność (nadpobudliwość, trudności poznawcze), nowotwory tarczycy, jajnika, piersi	Sheikh i Beg 2020 (80) FAO i UNEP 2021 (23)

cd. tab. 1

Zanieczyszczenie	Efekty zdrowotne	Literatura
Produkty uboczne dezynfekcji	rakotwórcze; potencjalny wpływ na funkcje rozrodcze (niepłodność, poronienia, wady rozwojowe)	Lei i in. 2015 (46)
Dodatki do benzyny	rakotwórcze	Lei i in. 2015 (46)
Nanomateriały	nowotwory płuc, neurotoksyczność, zaburzenia funkcji poznawczych, stres oksydacyjny i stany zapalne	Rahman i in. 2020 (72) Lei i in. 2015 (46) FAO i UNEP 2021 (23)
Farmaceutyki stosowane w medycynie i weterynarii	zaburzenia hormonalne, stany zapalne, zmiany w płodności, zmiany w układzie oddechowym (astma), występowanie antybiotykooporności i lekooporności	Lei i in. 2015 (46) FAO i UNEP 2021 (23) Kuppusamy i in. 2018 (43)
Ftalany i inne plastyfikatory (BPA)	ciężowy zespół metaboliczny, ADHD u dzieci, wpływ na gospodarkę hormonalną (działanie estrogenne i antyestrogenne), teratogenność (wady prenatalne), wpływ na układ rozrodczy, wpływ na układ oddechowy	Gao i in. 2021 (26) Praveena i in. 2020 (70) De-la-Torre 2020 (17) Di Nisio i Foresta 2019 (16) Ramasamy i Palanisamy 2021 (73) FAO i UNEP 2021 (23)
Plastiki i polimery syntetyczne	stres oksydacyjny i zmiany zapalne, zaburzenia oddechowe, zapalenie płuc	FAO i UNEP 2021 (23) Wright i Kelly 2017 (98) Ramasamy i Palanisamy 2021 (73)

Źródło: opracowanie własne na podstawie literatury

Zanieczyszczenia mogą również wywoływać stres oksydacyjny w komórkach (63) oraz produkcję białek stresowych (87), a także wykazywać działanie rakotwórcze (20). Rozwój nowotworów, w tym raka piersi, białaczki i raka tarczycy, zaobserwowano u ludzi narażonych na podwyższone stężenia DDT/DDE i dioksyn (9, 75). Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (36) opracowała klasyfikację dotyczącą identyfikacji zagrożeń rakotwórczych dla ludzi. Wydzielono cztery kategorie zanieczyszczeń w zależności od potencjalnego ryzyka rakotwórczego; przykłady substancji wykazujących różny stopień rakotwórczości przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Klasyfikacja oraz przykłady zanieczyszczeń rakotwórczych

Grupa	Klasyfikacja	Liczba substancji	Zanieczyszczenia
1	rakotwórcze dla ludzi	120	azbest, As, Cd, Cr(VI), Ni, PCBs,
2A	prawdopodobnie rakotwórcze	88	glifosat, nieorganiczne związki Pb
2B	potencjalnie rakotwórcze	313	metylo-Hg, ftalany
3	niesklasyfikowane jako rakotwórcze	499	Cr(III)

Źródło: IARC, 2021 (36)

Światowa Organizacja Zdrowia (97) wskazała kilka zanieczyszczeń występujących w glebach jako najbardziej istotne dla zdrowia publicznego: As, Cd, Pb, Hg, dioksyny, pestycydy i azbest. Zanieczyszczenia te znane są ze skutków zdrowotnych, takich jak działanie rakotwórcze (As, azbest i dioksyny), wady neurologiczne i obniżenie ilorazu inteligencji (As i Pb), choroby nerek (Pb, Hg i Cd) oraz choroby układu kostnego (Pb) (97).

Większość informacji o wymienionych wyżej skutkach zdrowotnych powodowanych przez zanieczyszczenia bazuje na wynikach badań toksykologicznych substancji chemicznych prowadzonych w warunkach laboratoryjnych (tab. 1), natomiast niewiele jest danych epidemiologicznych pochodzących z badań prowadzonych na terenach zanieczyszczonych; ich przykłady przedstawiono w tabeli 3. W badaniach tych uwzględniano najczęściej jedną grupę zanieczyszczeń (18, 53, 91, 94) lub pojedyncze pierwiastki (47, 64), tylko w kilku pracach analizowano związki pomiędzy mieszaniną różnych substancji a skutkami zdrowotnymi u ludzi (68, 14, 57). Narażenie oceniano na podstawie analizy zawartości zanieczyszczeń w glebie (51), w płynach ustrojowych takich jak krew (18, 53, 91, 94) i mocz (64) lub korzystano z dostępnych danych monitoringowych (68, 14, 57). Najczęściej oceniano skutki zdrowotne zanieczyszczenia gleb u dorosłych (51, 57, 64), natomiast rzadziej u dzieci (47).

Tabela 3

Przykłady badań epidemiologicznych na terenach zanieczyszczonych

Zanieczyszczenie	Region	Efekt	Źródło
Σ 24PCB (B: 55–34378 ng·g ⁻¹ tłuszczu) PCB 153 (B: 55–34378 ng·g ⁻¹ tłuszczu)	Brescia, Włochy	brak wpływu na hormony tarczycy (FT4 i TSH)	Donato i in. 2008 (18)
Σ PCB (G: 8 mg·kg ⁻¹)	Brescia, Włochy	pozytywny związek pomiędzy zawartością PCB a występowaniem chłoniaka nieziarniczego	Maifredi i in. 2011 (51)
Σ 30PCB (B: 4,5–10,03 ng·cm ⁻³)	Salerno, Włochy	pozytywna korelacja pomiędzy PCB a występowaniem wad wrodzonych	Marra i in. 2012 (53)
Metale, WWA, związki chlorowane	44 NPCS, Włochy	wzrost zachorowalności na nowotwory oraz śmiertelności z powodu raka płuc, chorób układu oddechowego, niewydolności nerek	Pirastu i in. 2013 (68) Comba i in. 2014 (14)
10 PFAS (B: 0,64–4,77 ng·cm ⁻³)	Tajwan	występowanie raka piersi u kobiet ≤ 50 roku życia	Tsai i in. 2020 (91)
Metale (Co, Cu, Sn)	Chiny	ADHD u dzieci w wieku 6–11 lat	Li i in. 2020 (47)
WWA, metale, PCB, ftalany, dioksyny	São Paulo, Brazylia	częstsze występowanie raka piersi w terenach o wyższych poziomach zanieczyszczeń	Montanha i in. 2020 (57)
Cd (U: 0,04–6,08 μg·dm ⁻³)	Chiny	pierwotna niewydolność jajników (wpływ na hormony FSH i LH)	Pan i in. 2021 (64)

cd. tab. 3

Zanieczyszczenie	Region	Efekt	Źródło
Dioksyny (B: 28–157 pg·g ⁻¹)	Seveso, Włochy	występowanie nowotworów (piersi i tarczycy) u kobiet po 30 latach od awarii zakładów chemicznych w Seveso	Warner i in. 2011(94)

NPCS: krajowe priorytetowe miejsca zanieczyszczone; G: zawartość zanieczyszczenia w glebie; B: zawartość zanieczyszczenia w surowicy krwi; U: zawartość w moczu

Źródło: opracowanie własne na podstawie literatury

Na szczególną uwagę zasługują tzw. *emerging contaminants*. Mogą one powodować szereg potencjalnych skutków zdrowotnych, jak: choroby tarczycy (PFAS, PBDEs), zaburzenia płodności (PFAS, farmaceutyki, BPA), stany zapalne organizmu (plastiki i polimery syntetyczne, nanomateriały), nowotwory (PBDEs, nanomateriały) czy otyłość (PFAS) (tab. 1), jednak dla większości tych zanieczyszczeń mechanizmy ich szkodliwego oddziaływania nie są w pełni poznane. Wyniki badań toksykologicznych z udziałem zwierząt wskazują na potencjalną neurotoksyczność, hepatotoksyczność oraz immunotoksyczność substancji takich jak PFAS (49). Wysokie stężenia tych związków (do 12,8 mg·cm⁻³) odnotowywano w różnych organach i tkankach człowieka, m.in. we krwi, włosach, w wątrobie, moczu, mleku matki i paznokciach zarówno dorosłych, jak i dzieci (49). Uważa się, że PFAS mogą wywierać potencjalnie szkodliwy wpływ na procesy uczenia się, zachowanie dzieci (ADHD), płodność kobiet, poziom cholesterolu i układ odpornościowy, a także mogą zwiększać ryzyko zachorowania na raka (46, 49, 59). Doniesienia literaturowe w tym zakresie są jednak niejednoznaczne i nieliczne (46, 91), brakuje szerszych badań epidemiologicznych, jak również informacji o drogach narażenia, poziomach zawartości w organizmie człowieka oraz interakcji z innymi zanieczyszczeniami.

Skutki zdrowotne zanieczyszczenia mogą wiązać się również z wpływem na zdrowie psychiczne człowieka. W Holandii przeprowadzono badania obejmujące analizę kosztów i korzyści związanych z rekultywacją gleby (99). Zaobserwowano wzrost poziomu stresu u osób mieszkających na skażonym terenie (lub w jego pobliżu), co wiązało się ze świadomością ryzyka związanego z zanieczyszczeniem oraz strat ekonomicznych (spadek wartości terenu, utrata własności).

Czynniki wpływające na skutki zdrowotne

O zakresie skutków zdrowotnych związanych z zanieczyszczeniem gleb decyduje szereg czynników, takich jak: rodzaj, właściwości oraz zawartość zanieczyszczeń; poziom i czas trwania narażenia; rodzaj drogi narażenia; wiek osoby narażonej oraz czynniki podatności osobniczej, a także właściwości gleb determinujące biodostępność substancji chemicznych (9, 23, 44). Często jest więc trudno jednoznacznie określić zależności pomiędzy występowaniem schorzeń u ludzi a obecnością zanieczyszczeń

w glebie (18, 53, 91, 94). Człowiek narażony jest na działanie wielu związków chemicznych, o różnych właściwościach oraz różnych mechanizmach oddziaływania i toksyczności, pomiędzy którymi zachodzą interakcje (synergizm, antagonizm lub addytywność). Zanieczyszczenia często występują w bardzo małych stężeniach (np. dioksyny, PFAS, nanocząstki), mogą wykazywać duży potencjał do bioakumulacji lub biomagnifikacji, a ich skumulowane skutki są widoczne dopiero po długim okresie narażenia (23). Niektóre substancje chemiczne, które powodują poważne szkody zdrowotne w wysokich dawkach, mogą być nieszkodliwe lub nawet niezbędne w niskich dawkach. Selen i cynk są przykładami mikroelementów pochodzenia geochemicznego, które odgrywają kluczową rolę w mechanizmach antyoksydacyjnych i odporności (6, 54, 60).

Należy również pamiętać, że człowiek może być jednocześnie narażony na zanieczyszczenia występujące we wszystkich elementach środowiska (powietrzu, wodzie, żywności, pyłe i glebie), które mogą wnikać do organizmu człowieka różnymi drogami. Narażenie związane jest nie tylko z wdychaniem pyłu i oparów pochodzących z substancji zanieczyszczających glebę czy spożyciem skażonych cząstek gleby, ale również ze spożyciem skażonej żywności, wody oraz absorpcją zanieczyszczeń przez skórę (85, 103).

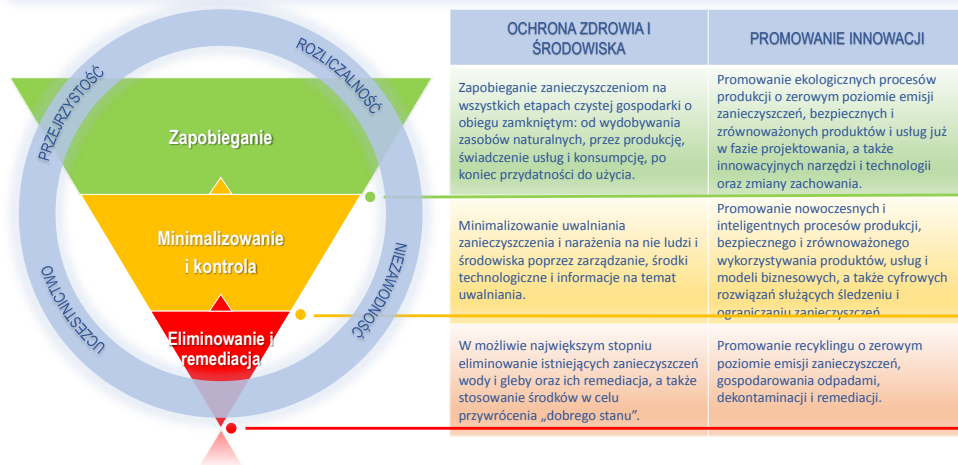
Wpływ zanieczyszczenia gleby na zdrowie zależy również od podatności ludzi w obrębie danej populacji czy też społeczności, co wynika z wydajności indywidualnych mechanizmów obronnych (np. zdolność do usuwania zanieczyszczeń przez wątrobę i nerki), cech genetycznych, stylu życia, nawyków żywieniowych i wieku. Uważa się, że najbardziej podatni na wpływ zanieczyszczeń są starsi ludzie, dzieci i kobiety w ciąży (44). Częściej negatywne skutki zdrowotne obserwowane są u osób prowadzących niehigieniczny tryb życia (picie alkoholu, palenie papierosów) oraz obciążonych występowaniem innych chorób (14, 23, 31, 70).

Zanieczyszczenia w środowisku glebowym mogą podlegać różnym procesom abiotycznym i/lub biotycznym, w tym degradacji, sorpcji/desorpcji, pobieraniu przez rośliny, wymywaniu do wód gruntowych (15, 76), o przebiegu których decydują właściwości glebowe. Wymywanie, transport i biodostępność zanieczyszczeń nieorganicznych w glebie zależą głównie od pH, pojemności wymiany kationów, zawartości materii organicznej oraz frakcji ilastej, potencjału redoks oraz zawartości tlenków żelaza i manganu (4, 58). Na biodostępność i przemiany związków organicznych mają wpływ zarówno właściwości gleby (zawartość i charakter glebowej materii organicznej, wielkość i struktura porów glebowych, zawartość minerałów ilastych) oraz jej aktywność biologiczna, jak i czynniki klimatyczne (wilgotność, temperatura) oraz sposób użytkowania (15, 86). Potencjalna absorpcja związków organicznych w łańcuchu pokarmowym zależy od ich lotności, rozpuszczalności w wodzie, trwałości w środowisku oraz współczynnika biokoncentracji (76).

Metody przeciwdziałania

Zmniejszenie ryzyka zdrowotnego oraz ekologicznego związanego z zanieczyszczeniem gleby można osiągnąć poprzez działania, które polegają na ograniczaniu wprowadzania zanieczyszczeń do gleby oraz izolowaniu zanieczyszczeń lub oczyszczaniu zanieczyszczonych miejsc (rys. 5). Ogólnie strategie zapobiegawcze obejmują ograniczenie emisji zanieczyszczeń, przejście na niepowodujące zanieczyszczenia odnawialne źródła energii oraz przyjęcie niezanieczyszczających technologii produkcji i transportu (23, 44). Natomiast w rolnictwie istotne jest ograniczenie stosowania oraz lepsza kontrola ilości aplikowanych nawozów i środków ochrony roślin, jak również kontrola jakości obornika oraz egzogennej materii organicznej wprowadzanej do gleby (76). W celu zapobiegania nadmiernej akumulacji zanieczyszczeń w roślinach oraz ich przenoszeniu w łańcuchu pokarmowym zaleca się wybór odmian charakteryzujących się zdolnością do unikania zanieczyszczeń, wprowadzanie upraw alternatywnych (np. roślin przemysłowych lub biomasy na cele energetyczne), a także alternatywnych sposobów użytkowania gruntów (np. zalesianie) (81). Niezbędnym narzędziem przeciwdziałania zanieczyszczeniu gleb są również regulacje prawne; zarówno zasada „zanieczyszczający płaci”, jak i zaprzestanie subsydiów i ulg podatkowych dla zanieczyszczających gałęzi przemysłu muszą być integralnymi elementami programów kontroli zanieczyszczeń (13, 22, 44).

Unijna polityka w zakresie środowiska opiera się na **zasadzie ostrożności** oraz na zasadach **działania zapobiegawczego, naprawiania szkody** w pierwszym rzędzie u **źródła** i na **zasadzie „zanieczyszczający płaci”**.



Rys. 5. Hierarchia działań na rzecz eliminacji zanieczyszczeń

Źródło: COM400(2021) (13)

Pierwszym krokiem w ocenie i zarządzaniu zanieczyszczonymi glebami jest identyfikacja zanieczyszczeń oraz ryzyka, jakie mogą stwarzać dla ludzi i środowiska

(11, 88). Analiza taka jest podstawą podjęcia decyzji o remediacji oraz wprowadzenia środków ograniczających ryzyko w celu ochrony zdrowia publicznego i środowiska. Środki te powinny być proste, szybkie do wdrożenia w sytuacji, gdy usuwanie zanieczyszczeń nie jest możliwe i mogą obejmować następujące działania: zatrzymanie dalszego uwalniania zanieczyszczeń do gleby; pokrycie zanieczyszczonego obszaru warstwą nieprzepuszczalną (np. geowłókniną lub płytami betonowymi), aby zapobiec uwalnianiu się oparów, spływom wody deszczowej i wypłukiwaniu zanieczyszczeń; informowanie społeczności lokalnych o zagrożeniach związanych z danym miejscem; umieszczenie oznakowania ostrzegawczego; zabezpieczenie terenu, na przykład za pomocą ogrodzenia, w celu ograniczenia dostępu dla osób postronnych i zwierząt gospodarskich; zmiana sposobu użytkowania i ograniczenie wykorzystania terenu jedynie do produkcji żywnościowej (22, 76).

Techniki remediacji obejmują szereg metod fizycznych, chemicznych i biologicznych, które mogą być prowadzone w warunkach *ex-situ* lub *in-situ* (tab. 4). W metodach *in-situ* proces remediacji prowadzony jest w miejscu występowania zanieczyszczenia, bez konieczności przemieszczania gruntu, natomiast w metodach *ex-situ* konieczna jest wymiana skażonego gruntu i dalsze zagospodarowanie powstałego odpadu poza terenem jego wytworzenia.

Tabela 4

Podział metod remediacji gleb

Metody	<i>In situ</i>	<i>Ex situ</i>
Fizyczne	ekstrakcja parowa/napowietrzanie, wspomagana termicznie ekstrakcja parowa z gleby, stosowanie barier, elektroremediacja	spalanie, desorpcja termiczna, ekstrakcja parowa z gleby, segregacja gleby
Chemiczne	przemywanie gleby, stabilizacja/immobilizacja chemiczna	odmywanie gleby, zestalanie/stabilizacja, dehalogenacja, ekstrakcja rozpuszczalnikowa, chemiczne i fitochemiczne utlenianie/redukcja
Biologiczne	bioremediacja, fitoremediacja	kompostowanie, bioreaktory/filtry mikrobiologiczne
Wady	dłuższy czas trwania procesu, trudniejsza kontrola i monitorowanie efektywności procesu remediacji	duże koszty usuwania gleby, duże koszty związane z transportem, istotny negatywny wpływ na siedliska, trudniejsze przywrócenie struktury gleby oraz bioróżnorodności
Zalety	uniknięcie kosztów usuwania gleby, szybsza odbudowa struktury gleby i bioróżnorodności	szybszy przebieg procesu remediacji, łatwiejsza kontrola i monitoring procesu

Źródło: opracowanie własne na podstawie Wolniewicz i in., 2018 (95), Siebielec i in., 2019 (81) oraz FAO i UNEP, 2021 (23)

Konwencjonalne techniki usuwania zanieczyszczeń bazujące na metodach fizycznych i chemicznych związane są z wysokimi kosztami prowadzenia procesu remediacji. Stosowanie tych metod prowadzi często do nieodwracalnych zmian właściwości gleby, wiąże się z silną ingerencją w życie biologiczne i przejściowym wzrostem zagrożenia ekologicznego na skutek wtórnego zanieczyszczenia (65, 76). W związku z tym jako opłacalne, wydajne i przyjazne dla środowiska techniki remediacji zalecane są metody biologiczne polegające na przyspieszeniu i optymalizacji naturalnych procesów rozkładu mikrobiologicznego zachodzących w środowisku (bioremediacja) lub na wykorzystaniu roślin (i związanych z nimi drobnoustrojów glebowych) w celu zmniejszenia narażenia na zanieczyszczenia poprzez ich stabilizację *in situ*, ekstrakcję lub degradację (fitoremediacja). Remediacja gleb może również polegać na samooczyszczaniu, które bazuje na procesach biologicznego rozkładu zanieczyszczeń lub ich chemicznej immobilizacji zachodzących naturalnie w glebach. Procesy te mogą być wspomagane przez wprowadzanie substancji biogennych lub szczepionek mikrobiologicznych (23, 81).

Podsumowanie

Problem związku zanieczyszczenia gleb ze zdrowiem człowieka jest kompleksowy. Skutki zdrowotne wynikają z długotrwałego, bezpośredniego oddziaływania mieszanin różnych substancji chemicznych, które często występują w niskich stężeniach, mają zdolność do bioakumulacji i przechodzenia do łańcucha pokarmowego człowieka oraz mogą powodować odległe efekty zdrowotne, np. zmiany w gospodarce hormonalnej, nowotwory, zaburzenia metaboliczne lub neurologiczne. Negatywny wpływ zanieczyszczenia gleb związany jest również z pogorszeniem szeregu usług ekosystemowych, takich jak: dostarczanie żywności, retencja wody, składników odżywczych i zanieczyszczeń, regulacja emisji gazów cieplarnianych czy zmiany w bioróżnorodności gleb, co prowadzi do pogorszenia jakości życia ludzi. Przeprowadzona analiza dostępnej literatury wykazała, iż w ocenie skutków zdrowotnych zanieczyszczenia gleb wykorzystuje się najczęściej dane toksykologiczne opracowane dla pojedynczych substancji i wymagające stosowania arbitralnych współczynników bezpieczeństwa, natomiast niewiele jest jednoznacznych danych epidemiologicznych dotyczących stanu zdrowia mieszkańców terenów zanieczyszczonych. W badaniach często uwzględniano jedną grupę substancji lub pojedyncze pierwiastki, rzadko też analizowano tzw. czynniki zakłócające (np. styl życia, nawyki żywieniowe, wiek, współwystępowanie innych chorób) determinujące występowanie skutków zdrowotnych u ludzi oraz nie uwzględniano interakcji pomiędzy chemicznymi i środowiskowymi czynnikami stresowymi. Wyzwaniem dla współczesnej nauki jest analiza wpływu na zdrowie człowieka zanieczyszczeń pochodzących ze źródeł rozproszonych, w tym zanieczyszczeń nowo pojawiających się (ang. *emerging contaminants*), takich jak: mikro- i nanoplastiki, związki perfluorowane, farmaceutyki, geny oporności na antybiotyki. Istnieje potrzeba dalszych działań na rzecz eliminacji zanieczyszczeń

oraz ograniczania ryzyka zdrowotnego i środowiskowego poprzez zapobieganie uwalnianiu zanieczyszczeń, promowanie nowoczesnych ekologicznych technologii produkcji, ograniczenie stosowania oraz lepszą kontrolę jakości nawozów i środków ochrony roślin w rolnictwie.

Literatura

1. Ayuso-Álvarez A., García-Pérez J., Triviño-Juárez J.M., Larrinaga-Torrentegui U., González-Sánchez M., Ramis R., Boldo E., López-Abente G., Galán I., Fernández-Navarro P.: Association between proximity to industrial chemical installations and cancer mortality in Spain. *Environmental Pollution*, 2020, **260**: 113869.
2. Moatey P., Al-Mayahi A., Omidvarborna H., Baawain M.S., Sulaiman H.: Occupational exposure to pesticides and associated health effects among greenhouse farm workers. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 22251-22270.
3. Bento C.P.M., Goossens D., Rezaei M., Riksen M., Mol H.G.J., Ritsema C.J., Geissen V.: Glyphosate and AMPA distribution in wind-eroded sediment derived from loess soil. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 1079-1089.
4. Biswas B., Qi F., Biswas J.K., Wijayawardena A., Khan M.A.I., Naidu R.: The fate of chemical pollutants with soil properties and processes in the climate change paradigm – a review. *Soil Systems*, 2018, **2(51)**: 1-20, doi:10.3390/soilsystems2030051.
5. Brevik E.C., Pereg L., Steffan J.J., Burgess L.C.: Soil ecosystem services and human health. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, **5**: 87-92.
6. Brevik E.C., Slaughter L., Singh B.R., Steffan J.J., Collier D., Barnhart P., Pereira P.: Soil and human health: current status and future needs. *Air, Soil and Water Research*, 2020, **13**: 1-23.
7. Brevik E.C., Steffan J.J., Rodrigo-Comino J., Neubert D., Burgess L.C., Cerdà A.: Connecting the public with soil to improve human health. *European Journal of Soil Science*, 2019, **70**: 898-910, doi: 10.1111/ejss.12764.
8. Booth A., Aga D.S., Wester A.L.: Retrospective analysis of the global antibiotic residues that exceed the predicted no effect concentration for antimicrobial resistance in various environmental matrices. *Environment International*, 2020, **141**: 105796.
9. Bornman M., Delport R., Farias P., Anneck-Hahn N., Patrick S., Millar R.P., de Jager C.: Alterations in male reproductive hormones in relation to environmental DDT exposure. *Environment International*, 2018, **113**: 281-289.
10. Briggs D.: Environmental pollution and the global burden of disease. *British Medical Bulletin*, 2003, **68**: 1-24, doi: 10.1093/bmb/ldg019.
11. Cachada A., Ferreira da Silva E., Duarte A.C., Pereira R.: Risk assessment of urban soils contamination: the particular case of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Science of the Total Environment*, 2016, **551-552**: 271-284.
12. Ciria M., Echeverria-Palencia C.M., Callejas I., Jimenez K., Herrera Jr R., Hung W.C., Colima N., Schmidt A., Jay J.A.: Commercially available garden products as important sources of antibiotic resistance genes – a survey. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**: 43507-43514.
13. COM400(2021): Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Droga do zdrowej planety dla wszystkich. Plan działania UE na rzecz eliminacji zanieczyszczeń wody, powietrza i gleby. Komisja Europejska, 2021, Bruksela (12.5.2021).
14. Comba P., Ricci P., Iavarone I., Pirastu R., Buzzoni C., Fusco M., Ferretti S., Fazzo L., Pasetto R., Zona A., Crocetti E.: ISS-AIRTUM Working Group for the study of cancer incidence in contaminated sites.: Cancer incidence in Italian contaminated sites. *Ann Ist Super Sanita.*, 2014, **50(2)**: 186-191, doi: 10.4415/ANN_14_02_13.
15. Cycoń M., Mroziak A., Piotrowska-Seget Z.: Antibiotics in the soil environment – degradation and their impact on microbial activity and diversity. *Frontiers in Microbiology*, 2019, **10**: 338, doi: 10.3389/fmicb.2019.00338.

16. Di Nisio A., Foresta C.: Water and soil pollution as determinant of water and food quality/contamination and its impact on male fertility. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 2019, **17**(4): 1-13, <https://doi.org/10.1186/s12958-018-0449-4>.
17. De-la-Torre G.E.: Microplastics: an emerging threat to food security and human health. *J Food Sci Technol*, 2020, **57**(5): 1601-1608.
18. Donato F., Zani C., Magoni M., Gelatti U., Covolo L., Orizio G., Speziani F., Indelicato A., Scarcella C., Bergonzi R., Apostoli P.: Polychlorinated biphenyls and thyroid hormone serum concentrations among people living in a highly polluted area: A cross-sectional population based study. *Environmental Research*, 2008, **108**: 380-386.
19. Dzierlenga M.W., Allen B.C., Clewell III H.J., Longnecker M.P.: Pharmacokinetic bias analysis of an association between clinical thyroid disease and two perfluoroalkyl substances. *Environment International*, 2020, **141**: 105784.
20. Egorova D.O., Buzmakov S.S.: Carcinogenic and teratogenic status of human population and polychlorinated biphenyls contaminations of soils and biota (European pied flycatcher) in a Perm (Western Ural, Russia). *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**: 4299-4311.
21. FAO, ITPS: Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 2015, pp. 648.
22. FAO: Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2017, Rome, Italy.
23. FAO, UNEP.: Global assessment of soil pollution – Summary for policy makers. Rome, FAO, 2021.
24. Fernández-Navarro P., García-Pérez J., Ramis R., Boldo E., López-Abente G.: Industrial pollution and cancer in Spain: An important public health issue. *Environmental Research*, 2017, **159**: 555-563.
25. Filippini T., Torres D., Lopes C., Carvalho C., Moreira P., Naska A., Kasdagli M.I., Malavolti M., Orsini N., Vincenti M.: Cadmium exposure and risk of breast cancer: A dose-response meta-analysis of cohort studies. *Environment International*, 2020, **142**: 105879.
26. Gao H., Zhang C., Tao F.B.: Association between prenatal phthalate exposure and gestational metabolic syndrome parameters: a systematic review of epidemiological studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**: 20921-20938.
27. Gavrilescu M., Demnerowá K., Aamand J., Agathos S., Fava F.: Emerging pollutants in the environment: present and future challenges in biomonitoring, ecological risks and bioremediation. *New Biotechnology*, 2015, **32**(1): 147-156.
28. Geissen V., Mol H., Klimp E., Umlauf G., Nadal M., van der Ploeg M., van de Zee S.E.A.T.M., Ritsema C.J.: Emerging pollutants in the environment: a challenge for water resource management. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, **3**: 57-65.
29. Grenni P., Ancona V., Caracciola A.B.: Ecological effects of antibiotics on natural ecosystems: A review. *Microchemical Journal*, 2018, **136**: 25-39.
30. Grešner P., Zieliński M., Ligocka D., Polańska K., Wąsowicz W., Gromadzińska J.: Environmental exposure to persistent organic pollutants measured in breast milk of lactating women from an urban area in central Poland. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**: 4549-4557.
31. Grineski S.E., Staniswalis J.G., Bulathsinhala P., Peng Y., Gill T.E.: Hospital admissions for asthma and acute bronchitis in El Paso, Texas: Do age, sex, and insurance status modify the effects of dust and low wind events? *Environmental Research*, 2011, **111**: 1148-1155.
32. Guo J.J., Huang X.P., Xiang L., Wang Y.Z., Li Y.W., Li H., Cai Q.Y., Mo C.H., Wong M.H.: Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 2020, **137**: 105263.
33. He D., Luo Y., Lu S., Liu M., Song Y., Lei L.: Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *Trends in Analytical Chemistry*, 2018, **109**: 163-172.
34. He A., Li X., Ai Y., Li X., Li X., Zhang Y., Gao Y., Liu B., Zhang X., Zhang M., Peng L., Zhou M., Yu H.: Potentially toxic metals and the risk to children's health in a coal mining city: an investigation of soil and dust levels, bioaccessibility and blood lead levels. *Environment International*, 2020, **141**: 15788.

35. Hoek G., Ranzi A., Alimehmeti I., Ardeleau E.R., Arrebola J.P., Avila P., et al.: A review of exposure assessment methods for epidemiological studies of health effects related to industrially contaminated site. *Epidemiologia & Prevenzione*, 2018, Suppl 1, **42(5-6)**: 21-36.
36. IARC: Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1–125 – IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans [online]. **2021**, <https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/> (październik 2021).
37. Jeffries J., Martin I.: Updated technical background to the CLEA model. Science Report: SC050021/SR3. Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, UK, 2009, pp. 166.
38. Kaur I., Behl T., Aleya L., Rahman Md.H., Kumar A., Arora S., Akter R.: Role of metallic pollutants in neurodegeneration: effects of aluminium, lead, mercury, and arsenic in mediating brain impairment events and autism spectrum disorder. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**: 8989-9001.
39. Khmelevtsova L.E., Sazykin I.S., Azhogina T.N., Sazykina M.A.: The dissemination of antibiotic resistance in various environmental objects (Russia). *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 43569-43581.
40. Klimkowicz-Pawlas A., Siebielec G., Suszek-Łopatka B., Maring L.: The impact of soil degradation on human health. Deliverable under the contract for DG-ENV “Providing support in relation to the implementation of the EU Soil Thematic Strategy” (Service contract No. 07.0201/2016/742739/SER/ENV.D.I), 2019, pp. 85.
41. Koppittke P.M., Menzies N.W., Wang P., McKenna B.A., Lombi E.: Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 2019, **132**: 105078.
42. Kotwani A., Joshi J., Kaloni D.: Pharmaceutical effluent: a critical link in the interconnected ecosystem promoting antimicrobial resistance. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**: 32111-32124.
43. Kuppusamy S., Kakarla D., Venkatesvarlu K., Megharaj M., Yoon Y.E., Lee Y.B.: Veterinary antibiotics (Vas) contamination as a global agro-ecological issue: a critical review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, **257**: 47-59.
44. Landrigan P.J., Fuller R., Acosta N.J.R., Adeyi O., Arnold R., Basu N., Baldé A.B., Bertollini R., Bose-O'Reilly S., Boufford J.I., Breysse P.N., Chiles T., Mahidol C., Coll-Seck A.M., Cropper M.L., Fobil J., Fuster V., Greenstone M., Haines A., Hanrahan D., Hunter D., Khare M., Krupnick A., Lanphear B., Lohani B., Martin K., Mathiasen K.V., McTeer M.A., Murray C.J.L., Ndahimananjara J.D., Perera F., Potočnik J., Preker A.S., Ramesh J., Rockström J., Salinas C., Samson L.D., Sandilya K., Sly P.D., Smith K.R., Steiner A., Stewart R.B., Suk W.A., van Schayck O.C.P., Yadama G.N., Yumkella K., Zhong M.: The Lancet Commission on pollution and health. *Lancet*, 2018, **391**: 462-512.
45. Lehmann A., Leifheit E.F., Gerdawischke M., Rilling M.C.: Microplastics have shape- and polymer-dependent effects on soil aggregation and organic matter loss – an experimental and meta-analytical approach. *Microplastics and Nanoplastics*, 2021, **1**: 7, <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00007-x>
46. Lei M., Zhang L., Lei J., Zong L., Li J., et al.: Overview of emerging contaminants and associated human health effects. *BioMed Research International*, 2015, Article ID 404796, pp. 12, doi: 10.1155/2015/404796.
47. Li Y., Cha C., Lv X., Liu J., He J., Pang Q., Meng L., Kuang H., Fan R.: Association between 10 urinary heavy metal exposure and attention deficit hyperactivity disorder for children. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 31233-31242.
48. Lin Z., Yuan T., Zhou L., Cheng S., Qu X., Lu P., Feng Q.: Impact factors of the accumulation, migration and spread of antibiotic resistance in the environment. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**: 1741-1758.
49. Liu W., Wu J., He W., Xu F.: A review of perfluoroalkyl acids studies: Environmental behaviors, toxic effects, and ecological and health risks. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2019, vol. 5, **1**: 1-19, doi: 10.1080/20964129.2018.1558031.

50. Ma J., Li Y., Liu Y., Wang X., Lin C., Cheng H.: Metal(loid) bioaccessibility and children's health risk assessment of soil and indoor dust from rural and urban school and residential areas. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**: 1291-1303.
51. Maifredi G., Donato F., Magoni M., Orizio G., Gelatti U., Maiolino P., Zani C., Vassallo F., Scarcella C.: Polychlorinated biphenyls and non-Hodgkin's lymphoma: A case-control study in Northern Italy. *Environmental Research*, 2011, **111**: 254-259.
52. Markowicz A., Bondarczuk K., Cycoń M., Sułowicz S.: Land application of sewage sludge: response of soil microbial communities and potential spread of antibiotic resistance. *Environmental Pollution*, 2021, **271**: 116317.
53. Marra M.L., Zullo F., De Felice B., Nappi L., Guida M., Trifuoggi M., Nappi C., Di Spiezio Sardo A., Zizolfi B., Capece G., Visconti F., Troisi J., Ciccone C., Guida M.: Environmental pollution effects on reproductive health – Clinical-Epidemiological Study In Southern Italy. *Translational Medicine*, 2012, **4-5**: 39-56.
54. Middleton D.R.S., McComack V.A., Watts M.J., Schüz J.: Environmental geochemistry and cancer: a pertinent global health problem requiring interdisciplinary collaboration. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, doi: 10.1007/s10653-019-00303-9.
55. Millennium Ecosystem Assessment (MEA): Ecosystem and human well-being: synthesis, Island Press, Washington, DC, 2005.
56. Mir R.H., Sawhney G., Pottoo F.H., Mohi-u d-d in R., Madisheti S., Jachak S.M., Ahmed Z., Masoodi M.H.: Role of environmental pollutants in Alzheimer's disease: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 44724-44742.
57. Montanha D., Martins L.C., Braga A.L.F.: Breast cancer in the Baixada Santista region and its relationship to contaminated areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 23181-23187.
58. Muhlbachova G., Sagova-Mareckova M., Omelka M., Szakova J., Tlust P.: The influence of soil organic carbon on interactions between microbial parameters and metal concentrations at long-term contaminated site. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 218-223.
59. Naidu R., Nadebaum P., Fang C., Cousins I., Pennell K., Conder J., Newell C.J., Longpré D., Warner S., Crosbie N.D., Surapaneni A., Bekele D., Spiess R., Bradshaw T., Slee D., Liu Y., Qi F., Mallavarapu M., Duan L., McLeod L., Bowman M., Richmond B., Srivastava P., Chadalavada S., Umeh A., Biswas B., Barclay A., Simon J., Nathanail P.: Per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS): current status and research needs. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, **19**: 100915.
60. Naidu R., Biswas B., Willett I.R., Cribb J., Singh B.K., Nathanail C.P., Coulon F., Semple K.T., Jones K.C., Barclay A., Aitken R.J.: Chemical pollution: a growing peril and potential catastrophic risk to humanity. *Environment International*, 2021, **156**: 106616.
61. OECD: OECD/UNEP Global PFC Group, Synthesis paper on per- and polyfluorinated chemicals (PFCs), Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD, 2013, pp. 60.
62. Orgiazzi A., Panagos P., Yigini Y., Dunbar M.B., Gardi C., Montanarella L., Ballabio C.: A knowledge-based approach to estimating the magnitude and spatial patterns of potential threats to soil biodiversity. *Science of the Total Environment*, 2016, **545-546**: 11-20.
63. Pagano G., Guida M., Tommasi F., Oral R.: Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements – knowledge gaps and research prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **115**: 40-48.
64. Pan W., Ye X., Zhu Z., Li C., Zhou J., Liu J.: Urinary cadmium concentrations and risk of primary ovarian insufficiency in women: a case-control study. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**: 2025-2035.
65. Pérez A., Rodríguez-Eugenio N.: Status of local soil contamination in Europe. JRC Technical Report, 2018.
66. Pereira A.R., de Oliveira Paranhos A.G., de Aquino S.F., de Queiroz Silva S.: Distribution of genetic elements associated with antibiotic resistance in treated and untreated animal husbandry waste and wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**: 26380-26403.

67. Pérez R., Suelves T., Molina Y., Corpas-Burgos F., Yusà V.: Biomonitoring of mercury in hair of children living in the Valencian Region (Spain). Exposure and risk assessment. *Chemosphere*, 2019, **217**: 558-566.
68. Pirastu R., Pasetto R., Zona A., Ancona C., Iavarone I., Martuzzi M., Comba P.: The health profile of populations living in contaminated sites: Sentieri approach. *Journal of Environmental and Public Health*, Hindawi Publishing Corporation, 2013, Article ID 939267: 13.
69. Ponciano-Rodríguez G., Gaso M.I., Armienta M.A., Trueta C., Morales I., Alfaro R., Segovia N.: Indoor radon exposure and excess of lung cancer mortality: the case of Mexico—an ecological study. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**: 221-234.
70. Praveena S.M., Minisvaradass R., Masiran R., Rajendran R.K., Lin C.C., Kumar S.: Phthalates exposure and attention-deficit/hyperactivity disorder in children: a systematic review of epidemiological literature. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 44757-44770.
71. Qu C., Albanese S., Li J., Cicchella D., Zuzolo D., Hope D., Cerino P., Pizzolante A., Doherty A.L., Lima A., De Viti B.: Organochlorine pesticides in the soils from Benevento provincial territory, southern Italy: Spatial distribution, air-soil exchange, and implications for environmental health. *Science of the Total Environment*, 2019, **674**: 159-170.
72. Rahman M.A., Rahman M.S., Uddin M.J., Mamun-O r-Rashid A.N.M., Pang M.G., Rhim H.: Emerging risk of environmental factors: insight mechanisms of Alzheimer's diseases. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 44659-44672.
73. Ramasamy B.S.S., Palanisamy S.A.: Review on occurrence, characteristics, toxicology and treatment of nanoplastic waste in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**: 43258-43273.
74. Rillig M.C., Leifheit E., Lehmann J.: Microplastic effects on carbon cycling processes in soils. *PLoS Biology*, 2021, **19**(3): e3001130, <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001130>
75. Rodgers K., Udesky J.O., Rudel R.A., Brody J.G.: Environmental chemicals and breast cancer: An updated review of epidemiological literature informed by biological mechanisms, *Environmental Research*, 2018, **160**: 152-182.
76. Rodríguez-Eugenio N., McLaughlin M., Pennock D.: Soil Pollution: a hidden reality. Rome, FAO. 2018, pp. 142.
77. Roslund M.I., Rantala S., Oikarinen S., Puhakka R., Hui N., Parajuli A., Laitinen O.H., Hyöty H., Rantalainen A.L., Sinkkonen A.: ADELE team: Endocrine disruption and commensal bacteria alteration associated with gaseous and soil PAH contamination among daycare children. *Environment International*, 2019, **130**: 104894, doi: 10.1016/j.envint.2019.06.004
78. Sandifer P.A., Sutton-Grier A.E., Ward B.P.: Exploring connections among nature, biodiversity, ecosystem services, and human health and well-being: Opportunities to enhance health and biodiversity conservation. *Ecosystem Services*, 2015, **12**: 1-15.
79. Sharma S., Wakode S., Sharma A., Nair N., Dhobi M., Wani M.A., Pottoo F.H.: Effect of environmental toxicants on neuronal functions. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 44906-44921.
80. Sheikh I.A., Beg M.A.: Structural studies on the endocrine-disrupting role of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in thyroid diseases. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 37866-37876.
81. Siebielec G., Hageman N., Klimkowicz-Pawlas A.: Soils4EU Policy Brief 1 "Sustainable Soil Management". Deliverable under the contract for DG-ENV "Providing support in relation to the implementation of the EU Soil Thematic Strategy", 2019, pp.25.
82. Singh D., Singh C.F.: Impact of direct soil exposure from airborne dust and geophagy on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2010, **7**: 1205-1223.
83. Stafoggia M., Zauli-Sajani S., Pey J., Samoli E., Alessandrini E., Basagaña X., Cernigliaro A., Chiusolo M., Demaria M., Díaz J., Faustini A., Katsouyanni K., Kelesis A.G., Linares C., Marchesi S., Medina S., Pandolfi P., Pérez N., Querol X., Randi G., Ranzi A., Tobias A., Forastiere F., and the MED-PARTICLES Study Group: Desert dust outbreaks in Southern Europe: Contribution to daily PM10 concentrations and short-term associations with mortality and hospital admissions. *Environmental Health Perspective*, 2016, **124**(4): 413-419.

84. Steenland K., Fletcher T., Savitz D.A.: Epidemiologic evidence on the health effects of perfluorooctanoic acid (PFOA). *Environmental Health Perspectives*, 2010, **118**(8): 1100-1108.
85. Steffan J.J., Brevik E.C., Burgess L.C., Cerdà A.: The effect of soil on human health: an overview. *European Journal of Soil Science*, 2018, **69**: 159-171.
86. Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska-Kordybach B.: Biodostępność trwałych zanieczyszczeń organicznych (TZO) w glebach. W: *Zagrożenia dla prawidłowego funkcjonowania gleb użytkowanych rolniczo – wybrane zagadnienia. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy* 2013, **35**(9): 137-154.
87. Sun K., Song Y., Zong W., Tang J., Liu R.: Anthracene-induced DNA damage and oxidative stress: a combined study at molecular and cellular levels. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 41458-41474.
88. Swartjes F.A.: Introduction to contaminated site management. In: *Dealing with contaminated sites. From theory towards practical application*, Swartjes F.A. (ed.). Dordrecht: Springer publishers, 2011, 3-87.
89. Swartjes F.A.: Human health risk assessment related to contaminated land: state of the art. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, **37**: 651-673.
90. Swartjes F.A., Cornelis C.: Human Health Risk Assessment. In: *Dealing with contaminated sites. From theory towards practical application*, Swartjes F.A. (ed.). Dordrecht: Springer publishers, 2011, 209-259.
91. Tsai M.S., Chang S.H., Kuo W.H., Kuo C.H., Li S.Y., Wang M.Y., Chang D.Y., Lu Y.S., Huang C.S., Cheng A.L., Lin C.H., Chen P.C.: A case-control study of perfluoroalkyl substances and the risk of breast cancer in Taiwanese women. *Environment International*, 2020, **142**: 105850.
92. UNEP: Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs), 2020, <http://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>
93. Wag g C., Bender S.F., Widmer F., van der Heijden M.G.A.: Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *PNAS*, 2014, **111**(14): 5266-5270, doi:10.1073/pnas.1320054111.
94. Warner M., Mocarelli P., Samuels S., Needham L., Brambilla P., Eskenazi B.: Dioxin exposure and cancer risk in the Seveso women's health study. *Environmental Health Perspectives*, 2011, **119**(12): 1700-1705.
95. Wołniewicz A., Czechowski J., Kaliszewski T., Marecik R.: Przegląd metod remediacji i praktyczne zastosowanie bioremediacji w likwidacji zanieczyszczeń węglowodorami. *Inżynieria Ekologiczna*, 2018, **19**(5): 47-52.
96. World Health Organization (WHO): Preamble to the Constitution of WHO as adopted by the International Health Conference, New York, 19 June–22 July 1946; signed on 22 July 1946 by the representatives of 61 States (Official Records of WHO, no. 2, p. 100) and entered into force on 7 April 1948, 1946.
97. World Health Organization (WHO): Science Communication Unit, University of the West of England, 2013. *Science for Environment Policy. In-depth Report: Soil Contamination: Impacts on Human Health*. Report produced for the European Commission DG Environment, September 2013. Available at: <http://ec.europa.eu/science-environment-policy>.
98. Wright S.L., Kelly F.J.: Plastic and human health: a micro issue? *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(12): 6634-6647.
99. van Wezel A.P., Franken R.O.G., Drissen E., Versluijs K.C.W., van den Berg R.: Societal cost-benefits analysis for soil remediation in the Netherlands. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2008, **4**(1): 61-74.
100. Xu B., Liu F., Cryder Z., Huang D., Lu Z., He Y., Wang H., Lu Z., Brookes P.C., Tang C., Gan J., Xu J.: Microplastics in the soil environment: occurrence, risks, interactions and fate – a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2020, **50**(21): 2175-2222.
101. Zhang B., Yang X., Chen L., Chao J., Teng J., Wang Q.: Microplastics in soils: a review of possible sources, analytical methods and ecological impacts. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2020, **95**: 2052-2068.

102. Zhang X., Zhao L., Tong D.Q., Wu G., Dan M., Teng B.: A systematic review of global desert dust and associated human health effects. *Atmosphere*, 2016, 7, **158**: 1-30.
103. Zornoz A.R., Acosta A.J., Bastida F., Dominguez S.D., Toledo D.M., Faz A.: Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. *SOIL*, 2015, **1**: 173-185, doi:10.5194/soil-1-173-2015.
104. <https://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/en/c/284478/>
-

Adres do korespondencji:

dr inż. Agnieszka Klimkowicz-Pawlas
Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 917
e-mail: agnes@iung.pulawy.pl

AUTOR

ORCID

Agnieszka Klimkowicz-Pawlas

0000-0002-4529-5274