



CZASOPISMO TECHNICZNE KTT

KWARTALNIK KRAKOWSKIEGO TOWARZYSTWA TECHNICZNEGO

Nr 204

Rok 145

Kraków 2025 r.

Grudzień-Luty

Nr Indeksu 334008

ISSN: 1425-8390



RECENZOWANE ARTYKUŁY NAUKOWE

mgr inż. Jakub Łygan¹, dr hab. inż. Anna Czaplicka, prof. PK²

¹⁾ Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Szkoła Doktorska PK, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

²⁾ Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Wykorzystanie wybranych biotestów do kontroli jakości środowiska wodnego

1. Wprowadzenie

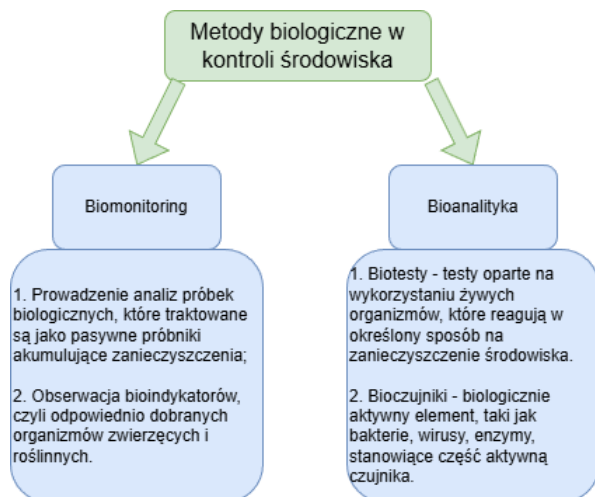
Wody powierzchniowe stanowią środowisko życia wielu organizmów. Jednocześnie wody powierzchniowe pełnią istotną funkcję dla człowieka, stanowiąc źródło wody użytkowej, a także miejsce rekreacji i wypoczynku. Narastająca presja antropogeniczna sprawia jednak, że do rzek, jezior i zbiorników wodnych trafiają zanieczyszczenia. Nagromadzenie tych zanieczyszczeń może prowadzić do pogorszenia jakości wód, zaburzenia funkcjonowania organizmów żywych, a w konsekwencji może stanowić również zagrożenie dla zdrowia człowieka. Współczesne techniki analityczne pozwalają na określenie jakościowe i ilościowe zanieczyszczeń, jednakże wszystkich potencjalnych kontaminantów (których może być potencjalnie ponad milion) nie jesteśmy w stanie przeanalizować ze względu na koszty i czas. Wskaźniki chemiczne nie dostarczają również informacji na temat oddziaływania zanieczyszczeń na organizmy. Stosowane metody biologiczne stanowią komplementarne uzupełnienie analiz chemicznych, umożliwiające ocenę rzeczywistego wpływu zanieczyszczeń na organizmy. Stosowanie metod biologicznych przez państwa członkowskie UE ma wyraźne umocowanie w Ramowej Dyrektywie Wodnej 2000/60/WE, która nakłada obowiązek oceny stanu ekologicznego wód z wykorzystaniem elementów jakości biologicznej do których należą fitoplankton, makrofity i fitobentos, bezkręgowce bentosowe i ichtiofauna [1]. Metody te stanowią przykład bioindykacji, głównie z wykorzystaniem indeksów biotycznych, służącej do oceny stopnia zanieczyszczenia środowiska wodnego niektórymi związkami organicznymi i biogenami. Przepisy te transponowane zostały do polskiego prawa przede wszystkim poprzez ustawę z dnia 18 lipca 2001 r. Prawo Wodne wraz z jej aktami wykonawczymi [2]. Zgodnie z art. 349 tej ustawy właściwy organ Inspekcji Ochrony Środowiska wykonuje badania wód powierzchniowych w zakresie elementów biologicznych, fizykochemicznych oraz chemicznych, a także wykonuje badania osadów dennych rzek i jezior. Należy jednak zwrócić uwagę, że wykorzystywanie

indeksów biotycznych nie pozwala na ocenę wpływu zanieczyszczeń na stan organizmów żyjących w wodach. Taką możliwość dają biotesty, które pozwalają na śledzenie reakcji organizmów na obecne w środowisku substancje toksyczne. Tym samym, w połączeniu z metodami fizykochemicznymi i biologicznymi, umożliwiają bardziej kompleksową ocenę oddziaływania zanieczyszczeń na poszczególne organizmy wodne [3]. Ustawa Prawo wodne zobowiązuje także, właściwy organ Inspekcji Ochrony Środowiska do prowadzenia badań bioakumulacji substancji priorytetowych w faunie i florze [2]. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych program monitoringowy obejmuje badania w zakresie 11 substancji obejmujących m.in. rtęć i jej związki, dioksyny i związki dioksynopodobne czy benzo(a)piren [4].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wybranych biologicznych metod badania środowiska wodnego, ze szczególnym uwzględnieniem biotestów. W pracy skupiono się przede wszystkim na biotestach z wykorzystaniem bezkręgowców, które stanowią czułe narzędzie do oceny jakości środowiska wodnego.

2. Metody biologiczne wykorzystywane w badaniach środowiska

W biologicznych metodach kontroli środowiska, wyróżnić można dwie grupy obejmujące biomonitoring oraz bioanalitikę (Rys.1) [5].



Rys. 1. Podstawowy podział metod biologicznych wykorzystywanych do kontroli jakości środowiska.
Źródło: [3]

Biomonitoring (monitoring biologiczny) definiuje się jako systematyczne obserwacje reakcji biologicznych na zmiany w środowisku w celu wykorzystania tych informacji w programie kontroli jakości [6]. Biomonitoring zanieczyszczeń może mieć charakter pasywny lub aktywny [7]. Metody pasywne obejmują obserwacje organizmów naturalnie występujących w ekosystemie i ocenę ich reakcji na panujące tam warunki środowiskowe. Aktywny biomonitoring polega natomiast na wykorzystaniu bioindykatorów (organizmów wskaźnikowych) hodowanych w warunkach laboratoryjnych, które następnie umieszczane są na określony czas w warunkach oddziaływania ksenobiotyków. Bioindykatory definiowane są jako organizmy lub ich grupy, których reakcje obserwuje się, aby ocenić stan środowiska i uzyskać informacje o kondycji ekosystemu [8]. Bioindykatory powinny cechować się następującymi cechami [9]:

1. Wyraźnie określone środowisko występowania, co oznacza, że są integralną częścią ekosystemu, którego stan jest oceniany.
2. Długi cykl życiowy, który pozwala gatunkowi przebywać w badanym środowisku przez odpowiednio długi czas w aktywnym stadium, umożliwiając gromadzenie rzetelnych informacji.
3. Wysoka liczebność występowania, co ułatwia pozyskiwanie materiału do badań.
4. Łatwość jednoznacznej identyfikacji, aby uniknąć pomyłek z gatunkami o odmiennej reakcji, co mogłoby prowadzić do błędnych wniosków.
5. Dobrze poznana morfologia i fizjologia organizmu, co pozwala na prawidłową interpretację zebranych danych.
6. Charakterystyczna i powtarzalna reakcja, adekwatna do stopnia zmian środowiskowych wywołanych działaniem czynników zewnętrznych.

Istnieje wiele podziałów bioindykatorów, w najbardziej ogólnym ujęciu wyróżnia się bioindykatory oddziaływania i bioindykatory akumulacji [10]. Bioindykatory oddziaływania rejestrują wpływ

czynników środowiskowych na układy ekologiczne i mogą być wykorzystywane do identyfikacji czynników antropogenicznych lub do oceny ich oddziaływania. Bioindykatory akumulacji natomiast są organizmami koncentrującymi w swoim organizmie substancje chemiczne.

Kontrola środowiska wodnego może być również prowadzona przy użyciu metod analitycznych wśród których ważną funkcję pełnią biotesty. Biotest (od gr. bios – życie oraz łąc. testari – poświadczać) to doświadczalna metoda biologiczna polegająca na wykorzystaniu żywego organizmu do wykrywania obecności substancji toksycznych w środowisku oraz służąca do oceny ich toksyczności [11]. Ocena ta odbywa się poprzez określenie wpływu badanego materiału (np. wody, osadów, zawiesiny) na organizm testowy i porównanie uzyskanych wyników z wynikami próby kontrolnej, czyli oddziaływania niezanieczyszczonej próbki na organizm. Do przeprowadzania biotestów najczęściej korzysta się z wytycznych ISO (International Organization for Standardization), OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) oraz standardów opracowanych przez amerykańską EPA (United States Environmental Protection Agency) i kanadyjską ECCC (Environment and Climate Change Canada). W piśmiennictwie wyróżnia się trzy główne sposoby prowadzenia badań, przy użyciu biotestów, które przedstawiają się następująco [11]:

1. Testy toksyczności przeprowadzane w laboratorium podczas których substancja toksyczna wprowadzana jest do przygotowanej wody lub osadu.
2. Testy toksyczności prowadzone w laboratorium z użyciem próbek wody lub osadów pobranych ze środowiska naturalnego.
3. Testy in situ, przeprowadzane z wykorzystaniem populacji zwierząt żyjących w naturalnych warunkach środowiska lub organizmów hodowanych laboratoryjnie, umieszczanych w środowisku naturalnym. Takie testy pozwalają ocenić efekty zanieczyszczenia w rzeczywistym ekosystemie i/lub wśród populacji organizmów autochtonicznych czy też organizmów hodowanych w laboratorium.

Zarówno z punktu widzenia etyki, jak i praktyczności, jako organizmy testowe w biotestach wykorzystywane są głównie mikroorganizmy, flora lub bezkręgowce, charakteryzujące się określonym cyklem życiowym i możliwością przetrwania w formie przetrwalników [12]. Ponadto w badaniach wykorzystuje się także należące do kręgowców ryby, jednakże prowadząc testy na kręgowcach, należy uzyskać zgodę komisji etycznej. Organizmy testowe powinny wyróżniać się następującymi cechami [5]:

1. Łatwa dostępność organizmu.
2. Prosta i stabilna hodowla w warunkach laboratoryjnych.
3. Dobrze udokumentowane pochodzenie populacji.
4. Znana wrażliwość na różne grupy zanieczyszczeń, która powinna być reprezentatywna dla gatunku lub gromady, do której organizmy te są zaliczane.

5. Przynależność do gatunku istotnego ekologicznie lub ważnego z punktu widzenia użytkowania środowiska.

Testy toksyczności pozwalają na identyfikację substancji toksycznych w próbce oraz umożliwiają ocenę wpływu tych substancji na organizmy testowe. Z tego względu w opisie wyników testów toksyczności stosuje się analizę zależności dawka–odpowiedź, która jest relacją między dawką lub stężeniem substancji chemicznej, a obserwowanym efektem biologicznym [5]. Podstawowymi parametrami określającymi toksyczność są punkty efektu połowicznego EC₅₀ (ang. effective concentration) i ED₅₀ (ang. effective dose). Są to odpowiednio takie stężenie w środowisku lub dawka substancji, które powodują uzyskanie 50% określonej, wcześniej zdefiniowanej odpowiedzi biologicznej. W ocenie toksyczności ostrej stosuje się natomiast parametry LD₅₀ (ang. lethal dose) i LC₅₀ (ang. lethal concentration), czyli takie dawki lub stężenia, które w określonym czasie powodują śmierć 50% osobników w badanej populacji. Możliwe jest również określenie stężenia substancji toksycznej, hamującej w 50% funkcje biologiczne i biochemiczne organizmów. Parametr ten definiowany jest jako IC₅₀ (ang. inhibitory concentration). Stężenia/dawki minimalne lub niewywołujące ocenianych efektów definiowane są następującymi wielkościami:

- NOEL, NOEC (ang. no observed effects level/concentration) – największa dawka lub najwyższe stężenie, przy których nie stwierdza się istotnego wzrostu częstości ani nasilenia skutków działania substancji względem próby kontrolnej.
- LOEL, LOEC (ang. lowest observed effects level/concentration) – najmniejsza dawka lub najniższe stężenie, dla których obserwuje się istotny wzrost częstości lub nasilenia skutków działania substancji względem próby kontrolnej
- NOAEL, NOAEC (ang. no observed effects level/concentration) – największa dawka lub najwyższe stężenie, przy których nie występuje istotny wzrost częstości lub nasilenia szkodliwych skutków względem próby kontrolnej.
- LOAEL, LOAEC (ang. lowest observed adverse effects level/concentration) – najmniejsza dawka lub najniższe stężenie, dla których stwierdza się istotny wzrost częstości występowania szkodliwych skutków względem próby kontrolnej.
- MTC (ang. minimum threshold concentration) – minimalne stężenie progowe.
- MTD (ang. maximum tolerated dose) – maksymalna dawka tolerowana.
- MATC (ang. minimum allowable toxicant concentration) – minimalne dopuszczalne stężenie substancji toksycznej.

Wśród podstawowych testów wyróżnia się badania toksyczności ostrej oraz toksyczności przewlekłej. Testy ostrej toksyczności pozwalają m.in. na ocenę zahamowania wzrostu glonów, określenie śmiertelności organizmów bezkręgowych oraz śmiertelności i zaburzeń równowagi u ryb [14]. Są to szybkie testy opracowane do oceny szkodliwego wpływu substancji toksycznych na organizmy w czasie ekspozycji

wynoszącym od 24 do 96 godzin. W przypadku gdy badanie ocenia śmiertelność organizmów, do opisu wyników wykorzystuje się parametry LD₅₀ i LC₅₀, natomiast w testach, w których mierzy się inne rodzaje odpowiedzi biologicznej, używa się wskaźników ED₅₀, EC₅₀ i IC₅₀. Badania pokazują, że nie ma gatunku uniwersalnego używanego w testach toksyczności ostrej, a wybór organizmu testowanego musi być dostosowany do rodzaju toksycznej substancji jak i specyfiki badanego ekosystemu [15]. Do najczęściej stosowanych organizmów testowych zalicza się m.in. skorupiaki *Daphnia magna*, glony *Pseudokirchneriella subcapitata*, ryby *Danio rerio*, czy też różne gatunki rzęsy wodnej.

Jeżeli test ostrej toksyczności nie wykazuje efektów, należy zastosować badania toksyczności przewlekłej. Ich celem jest ocena, czy długotrwała ekspozycja na subletalne dawki/stężenia toksykantu wywołują niekorzystne oddziaływanie na organizm testowy. Czas trwania testu zależy od wybranego organizmu testowego, dla skorupiaków takich jak *Daphnia magna* wynosi on około 21 dni, natomiast dla ryb *Pimephales promelas* może sięgać 300 dni [5]. Najczęściej stosuje się trzy typy testów chronicznych: testy obejmujące cały cykl życiowy, testy wczesnych stadiów rozwojowych oraz testy funkcjonalne [15]. Testy obejmujące cały cykl życiowy polegają na narażeniu organizmów od najwcześniejszych stadiów aż do osiągnięcia dojrzałości i rozrodu. Ocenia się w nich takie parametry, jak przeżywalność, wzrost, płodność i sukces rozrodczy w kolejnych fazach życia. W testach wczesnych stadiów rozwojowych uwaga koncentruje się natomiast na najbardziej wrażliwych etapach życia, takich jak jaja, zarodki i larwy. Sprawdza się wpływ substancji na przeżywalność, wzrost oraz występowanie wad rozwojowych w ograniczonym w krytycznym przedziale czasowym. Z kolei testy funkcjonalne badają, jak obecność toksykantu wpływa na wybrane procesy fizjologiczne i zachowanie organizmów, takie jak aktywność enzymatyczna, parametry krwi, kondycja histologiczna tkanek, zachowanie pływackie, reakcje sensoryczne czy odporność na choroby.

Innym rodzajem biotestów są badania bioakumulacji. Bioakumulacja jest definiowana jako proces pobierania substancji chemicznych ze środowiska naturalnego wszystkimi drogami, w tym poprzez transfer w łańcuchu pokarmowym [16]. Zjawisko to wykorzystuje się zarówno w typowych testach toksykologicznych jak i w biomonitoringu. Testy bioakumulacji wykorzystują współczynnik bioakumulacji BAF (ang. bioaccumulation factor) definiowany jako stosunek średniego stężenia badanego związku nagromadzonego w tkance organizmu testowego do średniego zmierzonego stężenia tego związku w środowisku [17]. Wykorzystywany jest również współczynnik biokoncentracji BCF (ang. bioconcentration factor), który może być mierzony jedynie w warunkach laboratoryjnych, tak aby wykluczyć substancje chemiczne pochodzące z pożywienia.

3. Wybrane gatunki bezkręgowców używane do kontroli środowiska wodnego

3.1 *Chironomus riparius*

Jedną z grup organizmów szeroko wykorzystywanych w biologicznych metodach kontroli środowiska wodnego są bezkręgowce bentosowe. Wśród nich najczęściej występującą grupą są muchówki z rodziny *Chironomidae*. Ich występowanie obejmuje obszary na całym świecie i różnorodne typy siedlisk, w tym środowiska o warunkach stresowych, takich jak niedobór wody, niskie pH, niska zawartość tlenu rozpuszczonego oraz wysokie obciążenie zanieczyszczeniami [18]. Pomimo wysokiej tolerancji larw na warunki zanieczyszczone *Chironomidae* wykazują mierzalne reakcje na poziomie molekularnym, morfologicznym i behawioralnym w następstwie kontaktu z kontaminantami [19]. Rodzina *Chironomidae* obejmuje ponad 8000 gatunków, z czego 661 występuje w Polsce [20]. Istotną właściwością rodzaju *Chironomus*, który jest powszechnie używany w biotestach jest także ograniczona zdolność przemieszczania się oraz stosunkowo długi cykl życiowy, a także łatwość odławiania. Cechy te umożliwiają ocenę długookresowych skutków zanieczyszczeń w środowisku wodnym [3]. Ich cykl życiowy zaczyna się od jaja, z którego wylęga się a. Rozwój larwalny obejmuje cztery stadia, oddzielone kolejnymi wylinkami [21]. Po ostatnim linieniu powstaje nieruchoma, nieodżywająca się poczwarka, z której wyłania się postać dorosła. Stadia larwalne są związane ze środowiskiem wodnym, natomiast dojrzała postać unosi się w powietrzu. Larwy *Chironomidae* adaptują się do zmian w środowisku ograniczając utratę wody [22]. Realizują to m.in. poprzez migrację w głąb wilgotnych osadów i budowę tubek ochronnych. Dodatkowo u części gatunków bardzo wysokie stężenie hemoglobiny w hemolimfie pozwala wykorzystywać śladowe ilości tlenu, co często przejawia się intensywnie czerwonym ubarwieniem larw. W Polsce czas rozwoju jednej generacji waha się od kilku tygodni do kilku miesięcy, a determinują go przede wszystkim rozmiar ciała oraz pora roku. Ze względu na swoją charakterystykę *Chironomidae* mają zastosowanie jako bioindykatory wód słodkich, jak i organizmy testowe [19]. Ich względna liczebność może być wykorzystywana w indeksach biotycznych [23], deformacje aparatów gębowych pełnią funkcję markerów toksyczności [24], a przeżywalność jest powszechnie używana do wyznaczania LC_{50} w testach toksyczności [25]. Najczęściej wykorzystywanymi rodzajami są *Chironomus riparius* i *Chironomus tentans*.

Testy toksyczności z wykorzystaniem *Chironomus riparius* stosują szereg znormalizowanych procedur związanych z oddziaływaniem zanieczyszczeń w środowisku wodnym. Wytyczna OECD 235 [26] opisuje 48-godzinny test ostrej toksyczności z wykorzystaniem larw w pierwszym stadium rozwojowym. Larwy są ekspozowane na badaną substancję w naczyniach zawierających wyłącznie wodę. Punktem końcowym w tym teście jest

immobilizacja oceniana po 24 i 48 h, na podstawie której wyznaczany jest wskaźnik EC_{50} . Długoterminowe oddziaływania w środowisku opisują wytyczne OECD 218 [27] oraz OECD 219 [28], obejmujące badania prowadzone w układach z wodą i osadami. W pierwszym teście wzbogacanym medium są osady, natomiast w drugim woda. Mierzone punkty końcowe obejmują liczbę wylutych samców, liczbę wylutych samic oraz czas potrzebny do wylucia oraz przeżywalność i wzrost larw. Wytyczna OECD 233 [29] zaprojektowana została do oceny skutków ekspozycji, obejmującej cały cykl życia *Chironomus riparius*. Mierzone punkty końcowe dla pierwszego i drugiego pokolenia testowanych organizmów obejmują: całkowitą liczbę wylutych dorosłych osobników, tempo rozwoju, stosunek płci wśród dorosłych osobników. Dodatkowo dla pierwszego pokolenia określana jest liczba złożów jajowych i płodność. Testy toksyczności z użyciem *Chironomus riparius* mogą być prowadzone przy takich zanieczyszczeniach jak:

- metale ciężkie, w tym kadm (Cd), miedź (Cu), cynk (Zn), ołów (Pb), nikiel (Ni), chrom (Cr), arsen (As), rtęć (Hg) [30 -34];
- pestycydy, w tym herbicydy [35];
- mikroplastiki [36];
- nanocząsteczki srebra [37];
- związki organiczne takie jak fenol, pentachlorofenol i wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne [38, 39].

Testy mogą być również prowadzone przy użyciu próbek środowiskowych takich jak: ścieki komunalne i przemysłowe, silnie zanieczyszczone wody powierzchniowe i osady dennie [40, 41].

Kolejnym aspektem wartym omówienia są zmiany zachodzące w organizmach larw *Chironomus riparius* pod wpływem ekspozycji na zanieczyszczenia. Obejmują one przede wszystkim deformacje aparatu gębowego oraz uszkodzenie materiału genetycznego [35, 42]. Obserwowane są również zmiany w budowie rurek, które larwy konstruują z detrytusy i cząstek osadu, które zapewniają im schronienie [43].

Larwy *Chironomidae* stanowią istotne ogniwo łańcucha pokarmowego. Żywią się one głównie obumarłą materią roślinną obecną w osadach dennych, natomiast same stanowią ważne źródło pokarmu dla licznych gatunków ryb, przedstawicieli widelnicowatych i otwornicowatych oraz niektórych pijawek [44]. Z tego powodu larwy *Chironomus riparius* są powszechnie wykorzystywane jako organizmy do badań bioakumulacji, zwłaszcza metali ciężkich. Ekspozycję prowadzi się w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych lub in situ, po czym larwy utrwalą się np. zamrażając je w ciekłym azocie [3]. Próbkę poddaje się ekstrakcji zanieczyszczeń stężonymi kwasami, a w otrzymanym ekstrakcie oznacza się stężenie badanych substancji. Równocześnie oznacza się stężenie tej substancji w osadach dennych, co pozwala ocenić jej biodostępność w środowisku.

Badania prowadzone przez Henrique i in. dotyczące bioakumulacji rtęci z wody wykazały, że larwy *Chironomus riparius* szybko bioakumulują rtęć,

osiągając po 24 godzinach średnie stężenie wynoszące 13,1 $\mu\text{g Hg/g}$ [45]. Następnie larwy przeniesiono do czystej, twardej wody w celu zbadania procesu eliminacji rtęci z ich organizmów. W 48-godzinny okresie eliminacji stężenie rtęci w organizmach zaczęło się nieznacznie obniżyć bezpośrednio po przeniesieniu, osiągając pod koniec tego okresu średnią wartość 8,03 $\mu\text{g Hg/g}$. W rozpatrywanym przedziale czasu, usunięciu uległo jedynie około 39% całkowitej zawartości rtęci.

Bervoets i in. dokonali badania bioakumulacji Cd, Cr, Cu, Pb, Ni i Zn z wykorzystaniem systemu klatkowego. Naukowcy dokonali porównania bioakumulacji metali ciężkich przez larwy umieszczone w klatkach z larwami autochtonicznymi [46]. Poziomy akumulacji w larwach eksponowanych w klatkach były porównywalne do stężeń odnotowanych u larw autochtonicznych. Jednakże odnotowano przypadki istotnych odchyleń. Prawdopodobną przyczyną tego był deficyt tlenowy w klatkach, który mógł modyfikować biodostępność metali poprzez zmianę warunków redoks.

W badaniu dotyczącym rzeki Świętego Wawrzyńca (Kanada) wykorzystano osady dennie pobrane ze środkowego odcinka rzeki [47]. W ramach badań biodostępności wybranych metali ciężkich przeprowadzono ekspozycję larw *Chironomus riparius* na pobrane osady dennie i te same osady poddane remediacji. Równolegle wykonano sekwencyjną ekstrakcję frakcji metali w osadach, aby scharakteryzować ich formy i potencjalną biodostępność. Na podstawie wyników stwierdzono, że stężenia metali w organizmach eksponowanych na osady nie różniły się statystycznie istotnie od stężeń w próbie kontrolnej, co jest spójne z danymi z ekstrakcji sekwencyjnej wskazującymi na duży udział metali związanych w stabilnych, słabo biodostępnych formach w próbkach osadu.

Na przestrzeni lat 2004–2006 dokonano badań dotyczących biodostępności Cr dla larw *Chironomus riparius* w rejonie górnego Dunajca [48, 49, 50]. Wykazano w nich, że chrom jest biodostępny zarówno dla larw autochtonicznych, jaki i larw poddanych ekspozycji w ramach testów laboratoryjnych i eksponowanych w klatkach. Nie wykazano natomiast korelacji pomiędzy stężeniem chromu, a kumulacją chromu w osadach.

3.2 *Daphnia magna*

Innym często stosowanym organizmem powszechnie wykorzystywanym w biologicznych metodach kontroli środowiska są skorupiaki z rodziny *Daphniidae*. Zamieszkują one większość stojących wód słodkich na całym świecie, od małych stawów po bardzo duże jeziora [51]. Rodzina *Daphniidae* obejmuje 300 gatunków, z czego 8 zaobserwowano w Polsce [52]. Dafnie są kluczowym gatunkiem w ekosystemach wodnych, gdzie pełnią rolę konsumentów pierwszego rzędu, odżywiając się drobnymi cząstkami, zwłaszcza jednokomórkowymi glonami, zawieszonymi w wodzie [53]. W związku z tym odgrywają ważną rolę w łańcuchu troficznym, będąc jednocześnie pokarmem dla ryb oraz różnych

drapieżnych bezkręgowców. Dafnie rozmnażają się w cyklu naprzemiennym. Na co dzień dominuje rozmnażanie bezpłciowe, jednak, gdy warunki ulegają pogorszeniu, populacja może rozmnażać się płciowo. Dzięki niewielkim rozmiarom, zbadanemu cyklowi życiowemu oraz dużym zdolnościom reprodukcyjnym, dafnie są często wykorzystywane do kontroli środowiska wodnego, najczęściej wykorzystywanym gatunkiem jest *Daphnia magna*. Dwa podstawowe, znormalizowane testy to krótkoterminowy test ostrej toksyczności OECD 202 [54] oraz test chroniczny OECD 211 [55]. Test OECD 202 to 48-godzinny test ostrej toksyczności, którego punktem końcowym jest unieruchomienie po 24 i 48 godzinach, na podstawie którego oblicza się wskaźnik EC_{50} . Test OECD 211 natomiast to 21-dniowy test oceniający wpływ substancji na rozród i przeżywalność. Głównym punktem końcowym jest liczba żywych potomków na samicę, a dodatkowymi parametrami są przeżywalność samic, czas do pierwszego miotu i opcjonalnie wskaźniki wzrostu. Na podstawie wyników wyznacza się parametry NOEC lub LOEC oraz EC_x . Dodatkowo dokładne obserwacje zachowania i fizjologii *Daphnia magna* pozwalają na dokonanie oceny szczegółowych parametrów. Obejmują one parametry pływania oraz wskaźniki fizjologiczne takie jak gęstość skurczów serca, tempo pobierania pokarmu, tempo filtracji czy aktywność odnóży piersiowych [56]. Parametry pływania znalazły zastosowanie w automatycznych systemach monitoringu jakości wód. Cyfrowe systemy śledzenia ruchu pozwalają na ciągłą rejestrację i analizę wzorców pływania, a odchylenia od typowego wzorca aktywności traktowane są jako sygnał obecności kontaminantu w wodzie [53].

W ostatnich latach szczególne zainteresowanie badaczy wzbudził wpływ nanomateriałów na rozwiłitki *Daphnia magna*. Vital i in. wykazali, że organizmy narażone na mikro i nanoplastiki (MNP) produkowały średnio o 13,6 mniej młodych osobników, co odpowiadało redukcji o 20,8% w porównaniu z próbą kontrolną [57]. Efekt ten był kontrolowany przez stężenie MNP, czas ekspozycji, temperaturę, przy czym mikroplastiki wywołują silniejszy negatywny wpływ niż nanoplastiki. Zhao i Wang przeprowadzili testy toksyczności nanocząsteczek srebra oraz ich bioakumulacji z wody i pożywienia [58]. Wykazali oni, że w 48-godzinny teście toksyczności ostrej nie zaobserwowano śmiertelności przy ekspozycji dafni na stężenie nanocząstek srebra (AgNP) wynoszące do 500 $\mu\text{g Ag/g}$. Bioakumulacja AgNP w tkankach dafni osiągnęła natomiast maksymalnie 22,9 mg Ag/g suchej masy. Rinke i in. przebadali wpływ 36 nanomateriałów na dafnię [59]. W testach ostrej toksyczności oceniali unieruchomienie osobników po 48 godzinach. Wyraźną, zależną od dawki toksyczność zaobserwowali tylko w przypadku materiałów, które uwalniały jony srebra, miedzi lub cynku. Na tej podstawie doszli do wniosku, że dla *Daphnia magna* w kontekście ostrej toksyczności liczą się przede wszystkim te nanomateriały, które potrafią uwalniać toksyczne jony metali.

4. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono możliwości wykorzystania muchówek *Chironomus riparius* i rozwielitek *Daphnia magna* do kontroli jakości środowiska wodnego. Omówiono metody biologiczne stanowiące komplementarne uzupełnienie analiz fizykochemicznych. Chapman już w 1990 roku podkreślił znaczenie równoczesnego stosowania obu tych elementów, wprowadzając metodę zwaną „Triadą Jakości Osadów” (ang. Sediment Quality Triad) [58]. Podejście to składa się z trzech komponentów, które są odrębne i komplementarne:

Tabela. 1. Informacje uzyskiwane poprzez analizę poszczególnych komponentów Triady Jakości Osadów.

Wariant	Zanieczyszczenie	Toksyczność	Zmiana w środowisku	Możliwy wniosek
1.	+	+	+	Mocne dowody na degradację wywołaną zanieczyszczeniem.
2.	-	-	-	Mocne dowody na brak degradacji wywołanej zanieczyszczeniem.
3.	+	-	-	Zanieczyszczenia nie są biodostępne
4.	-	+	-	Istnieją niemierzone substancje chemiczne lub warunki mogące powodować degradację.
5.	-	-	+	Zmiana nie wynika z wpływu toksycznych substancji chemicznych
6.	+	+	-	Toksyczne substancje chemiczne wywierają presję na system.
7.	-	+	+	Niemierzone toksyczne substancje chemiczne powodują degradację.
8.	+	-	+	Substancje chemiczne nie są biodostępne lub zmiana nie wynika z wpływu toksycznych substancji chemicznych.

Wyniki są przedstawiane jako dodatnie (+) lub ujemne (-), wskazując czy stwierdzono mierzalne różnice względem próby kontrolnej lub warunków referencyjnych

Źródło: [58]

oddziaływania dla organizmów. Bioanaliza osadów dostarcza bezpośrednich dowodów toksyczności, jednak prowadzona jest w warunkach laboratoryjnych, które mogą odbiegać od sytuacji panującej w środowisku. Parametry in situ odzwierciedlają rzeczywiste oddziaływanie w ekosystemie, o ile uwzględni się i wykluczy wpływ czynników niezwiązanych z zanieczyszczeniami. Bardziej wiarygodne wyniki uzyskuje się łącząc trzy niezależne komponenty (Tab. 1). Gdy skład chemiczny ujawnia wysokie stężenia zanieczyszczeń, testy laboratoryjne potwierdzają toksyczność, a w terenie widać wyraźne zmiany w składzie organizmów dennych, mamy mocny i spójny dowód na degradację. Jeśli natomiast, skład chemiczny ujawnił niskie stężenia substancji, testy laboratoryjne brak toksyczności, a parametry in situ nie wykazały zmian w biocenozie, można przyjąć, że osady nie są zdegradowane. W sytuacji, gdy wyniki nie są jednoznaczne należy pogłębić badania rozszerzając zakres analiz chemicznych, uzupełnić badania toksyczności o nowe organizmy testowe oraz lepiej rozpoznać warunki panujące w ekosystemie. Podwyższone stężenia substancji w osadach bez jednoczesnej toksyczności i bez zmian w środowisku mogą oznaczać ograniczoną biodostępność zanieczyszczeń, a wykryta toksyczność przy braku

- skład chemiczny osadów, który mierzy stan ilościowy zanieczyszczeń;
- bioanaliza osadów, która dostarcza informacji o toksyczności;
- parametry in situ, które przedstawiają zmiany w środowisku.

Wyniki uzyskane z poszczególnych elementów nie należy interpretować indywidualnie, ponieważ nie dostarczają one pełnej informacji o stanie środowiska [58]. Skład chemiczny osadów pozwala określić poziom zanieczyszczenia, lecz nie przesądza o dostępności biologicznej ani o możliwych skutkach

przekroczeń chemicznych sugeruje, że pominięto pewne związki lub zastosowane metody analityczne były niewystarczające. Zmiany w środowisku, mogą natomiast wynikać z powodu czynników naturalnych.

W pracy przedstawiono wybrane biologiczne metody kontroli środowiska wodnego, ze szczególnym uwzględnieniem biotestów wykorzystujących bezkręgowce. Omówiono podstawy testów toksyczności, zagadnienia bioakumulacji oraz zastosowanie muchówek *Chironomus riparius* i rozwielitek *Daphnia magna* jako organizmów testowych. Opisano również koncepcję Triady Jakości Osadów, która łączy dane chemiczne, wyniki biotestów oraz parametry mierzone in situ w celu kontroli stanu ekosystemów wodnych. Przedstawione przykłady pokazują możliwości zastosowania biotestów jako uzupełnienia klasycznych metod chemicznych i biologicznych w monitoringu wód i osadów. Zintegrowane wykorzystanie tych narzędzi umożliwia pełniejszą charakterystykę oddziaływania zanieczyszczeń na organizmy wodne.

Literatura

1. Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w

- dziedzinie polityki wodnej (Dz. Urz. WE L 327 z 22.12.2000, s. 1–73).
2. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. - Prawo wodne (Dz. U. 2025 poz. 960).
 3. Czaplicka, A. (2014). Wykorzystanie *Chironomidae* do biomonitoringu środowiska wodnego. Technologia Wody. Wydawnictwo 2K TECHNOLOGIE s.c.
 4. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych (Dz. U. 2021 poz. 1475).
 5. Traczewska, T. M. (2011). Biologiczne metody oceny skażenia środowiska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
 6. Matthews, R. A. Jr., Buikema, A. L., Cairns, J. Jr., & Rodgers, J. H. Jr. (1982). Biological monitoring. Part IIA. Receiving system functional methods, relationships and indices. Water Research.
 7. Markert, B. (2008). Bioindication and biomonitoring as innovative biotechniques for controlling trace metal influences to the environment. W: M. N. V. Prasad (red.), Trace Elements: Nutritional Benefits, Environmental Contamination, and Health Implications. John Wiley & Sons.
 8. Gerhardt, A. (2002). Bioindicator species and their use in biomonitoring. W: Environmental Monitoring – Vol. I – Bioindicator Species and Their Use in Biomonitoring. Encyclopedia of Life Support Systems.
 9. Zalewska, T. (2015). Bioindykatory makrofytobentosowe w klasyfikacji stanu środowiska morskiego południowego Bałtyku. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy.
 10. Dynowska, M., & Ciecierska, H. (2013). Biologiczne metody oceny stanu środowiska: podręcznik metodyczny. T. 1, Ekosystemy lądowe. UWM.
 11. Kuczyńska, A., Wolska, L., & Namieśnik, J. (2005). Application of biotests in environmental research. Critical Reviews in Analytical Chemistry.
 12. Łaszczyca, P., Francikowski, J., Guzik, J., i in. (2012). Przydatność biotestów ekotoksykologicznych do oceny stanu biologicznego wód na przykładzie zbiornika zaporowego w Goczałkowicach. Kosmos.
 13. Sekutowski, T. (2014). Bioindykatory w badaniu skażenia środowiska ksenobiotykami. Studia i Raporty IUNG-PIB.
 14. Jakubas, M., & Tatuśko, N. (2015). Przegląd wybranych biologicznych metod oceny stanu środowiska naturalnego. Inżynieria Ekologiczna.
 15. Lyubenova, M., & Boteva, S. (2016). Biotests in ecotoxicology: Current practice and problems. W: Toxicology – New Aspects to This Scientific Conundrum.
 16. U.S. Environmental Protection Agency. EPA EpoBox Terminology, EPA, (<https://www.epa.gov/expobox/epa-expobox-terminology>), (28.10.2025).
 17. Arnot, J. A., & Gobas, F. A. P. C. (2006). A review of BCF and BAF assessments for organic chemicals in aquatic organisms. Environmental Reviews.
 18. Karima, Z. (2020). *Chironomidae*: Biology, ecology and systematics. Biology, Environmental Science.
 19. Reyes-Maldonado, R., Marie, B., & Ramirez, A. (2021). Rearing methods and life cycle characteristics of *Chironomus* sp. Florida (*Chironomidae*: Diptera): A rapid-developing species for laboratory studies. PLoS ONE.
 20. Szadziński R, Gadawski P, Palaczyk A, Iwan D, Kamiński M. (2023) Digital Catalogue of Biodiversity of Poland — Animalia: Arthropoda: Hexapoda: Insecta: Diptera: Nematocera: *Chironomoidea*. Version 1.4. Polish Biodiversity Information Network.
 21. Klagkou, E., Gergs, A., Baden, C. U., & Lika, K. (2024). Modeling the bioenergetics and life history traits of *Chironomus riparius* – Consequences of food limitation. Insects.
 22. Grzybkowska, M. (2018). Ochotki – intrygujące owady. Pismo Polskiego Towarzystwa Przyrodników im. Kopernika.
 23. Panek, P. (2011). Wskaźniki biotyczne stosowane w monitoringu wód od czasu implementacji w Polsce Ramowej Dyrektywy Wodnej. Przegląd Przyrodniczy.
 24. Meregalli, G., Pluymers, L., & Ollevier, F. (2001). Induction of mouthpart deformities in *Chironomus riparius* larvae exposed to 4-n-nonylphenol. Environmental Pollution, 111(2), 241–246.
 25. do Prado, C. C. A., Queiroz, L. G., da Silva, F. T., & de Paiva, T. C. B. (2023). Toxicological effects caused by environmentally relevant concentrations of ketoconazole in *Chironomus sancticarioli* (Diptera, *Chironomidae*) larvae evaluated by oxidative stress biomarkers. Comparative Biochemistry and Physiology. Toxicology & Pharmacology.
 26. OCED. (2011). Test No. 235: *Chironomus* sp., Acute Immobilisation Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing
 27. OECD. (2023). Test No. 218: Sediment-Water Chironomid Toxicity Using Spiked Sediment. W: OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. OECD Publishing.
 28. OECD. (2023). Test No. 219: Sediment-Water Chironomid Toxicity Using Spiked Sediment. W: OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. OECD Publishing.
 29. OECD. (2010). Test No. 233: Sediment-Water Chironomid Life-Cycle Toxicity Test Using Spiked Water or Spiked Sediment. W: OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. OECD Publishing.
 30. Doria, H. B., & Pfenninger, M. (2021). A multigenerational approach can detect early Cd

- pollution in *Chironomus riparius*. *Chemosphere*.
31. Laviad-Shitrit, S., Sharaby, Y., Sela, R., Thorat, L., Nath, B. B., & Halpern, M. (2021). Copper and chromium exposure affect chironomid larval microbiota composition. *Science of the Total Environment*
 32. Vermeulen, A. C., Liberloo, G., Dumont, P., Ollevier, F., & Goddeeris, B. (2000). Exposure of *Chironomus riparius* larvae (Diptera) to lead, mercury and beta-sitosterol: Effects on mouthpart deformation and moulting. *Chemosphere*.
 33. Béchard, K., Gillis, P., & Wood, C. (2008). Acute toxicity of waterborne Cd, Cu, Pb, Ni, and Zn to first-instar *Chironomus riparius* larvae. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*.
 34. Mogren, C. L., von Kiparski, G. R., Parker, D. R., & Trumble, J. T. (2012). Survival, reproduction, and arsenic body burdens in *Chironomus riparius* exposed to arsenate and phosphate. *Science of the Total Environment*.
 35. Park, K., Park, J., Kim, J., & Kwak, I. S. (2010). Biological and molecular responses of *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae) to herbicide 2,4-D (2,4-dichlorophenoxyacetic acid). *Comparative Biochemistry and Physiology C: Toxicology & Pharmacology*.
 36. Redondo-Hasselerharm, P. E., Falahudin, D., Peeters, E. T. H. M., & Koelmans, A. A. (2018). Microplastic effect thresholds for freshwater benthic macroinvertebrates. *Environmental Science & Technology*.
 37. Silva, P. V., Santos, C. S. A., Papadimitrakou, A. G., Gonçalves, S. F., Prodana, M., Verweij, R. A., Lynch, I., van Gestel, C. A. M., & Loureiro, S. (2023). Toxicokinetics of silver and silver sulfide nanoparticles in *Chironomus riparius* under different exposure routes. *Science of the Total Environment*.
 38. Paumen, M. L., Borgman, E., Kraak, M. H., van Gestel, C. A., & Admiraal, W. (2008). Life cycle responses of the midge *Chironomus riparius* to polycyclic aromatic compound exposure. *Environmental Pollution*.
 39. Armitage, P. D., Cranston, P. S., & Pinder, L. C. V. (red.). (1995). *The Chironomidae: Biology and ecology of non-biting midges*. Chapman & Hall.
 40. Faria, M. S., Lopes, R. J., Nogueira, A. J., & Soares, A. M. (2007). In situ and laboratory bioassays with *Chironomus riparius* larvae to assess toxicity of metal contamination in rivers: The relative toxic effect of sediment versus water contamination. *Environmental Toxicology and Chemistry*
 41. Magdeburg, A., Stalter, D., & Oehlmann, J. (2012). Whole effluent toxicity assessment at a wastewater treatment plant upgraded with a full-scale post-ozoneation using aquatic key species. *Chemosphere*.
 42. Michailova, P., Szarek-Gwiazda, E., & Kownacki, A. (2009). Effect of contaminants on the genome of chironomids (*Chironomidae*, Diptera) living in sediments of Dunajec River and Czorsztyn Reservoir (Southern Poland). *Water, Air, and Soil Pollution*.
 43. Khedre, A. M., Ramadan, S. A., Ashry, A., i in. (2023). Seasonal variations of microplastic in sediment, *Chironomus* sp. larvae, and chironomid tubes in two wastewater sites in Sohag Governorate. *Environmental Science and Pollution Research*.
 44. Wachalowiec, A., Czaplicka-Kotas, A., & Szalińska, E. (2008). Biodostępność chromu z osadów dennych dla larw *Chironomus riparius*. *Ochrona Środowiska*.
 45. Azevedo-Pereira, H. M., Abreu, S. N., Lemos, M. F., & Soares, A. M. (2012). Bioaccumulation and elimination of waterborne mercury in the midge larvae, *Chironomus riparius* Meigen (Diptera: Chironomidae). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*.
 46. Bervoets, L., Meregalli, G., De Cooman, W., Goddeeris, B., & Blust, R. (2004). Caged midge larvae (*Chironomus riparius*) for the assessment of metal bioaccumulation from sediments in situ. *Environmental Toxicology and Chemistry*.
 47. Javid, M., Mulligan, C. N., Lefranc, M., & Rosabal Rodriguez, M. (2025). Metal exposure, bioaccumulation, and toxicity assessment in sediments from the St. Lawrence River before and after remediation using a resuspension technique. *Toxics*.
 48. Szalińska, E., Czaplicka-Kotas, A., Vignati, D. A. L., Ferrari, B. J. D., & Dominik, J. (2008). Bioavailability of sedimentary chromium for chironomids in the upper Dunajec River (Southern Poland). *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*.
 49. Szalińska, E., Czaplicka-Kotas, A., & d'Obyrn, K. (2006). Chrom w zlewni zbiornika Czorsztyńskiego – nierozwiązany problem. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*.
 50. Szalińska, E., Czaplicka-Kotas, A., Vignati, D. A. L., Ferrari, B. J. D., & Dominik, J. (2008). Spatial variability of sedimentary chromium as a limitation for determining its bioavailability for benthic invertebrates in the upper Dunajec River (Southern Poland). SETAC Europe 18th Annual Meeting, 25-29 V 2008 Warsaw, Poland,
 51. Ebert, D. (2005). Ecology, epidemiology, and evolution of parasitism in *Daphnia*. *Rozdział 2: Introduction to Daphnia biology*. National Center for Biotechnology Information (US) (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK2042/4>), (28.10.2025)
 52. GBIF Secretariat. (2025). *Daphniidae*. https://www.gbif.org/occurrence/taxonomy?q=Daphniidae&country=PL&occurrence_status=present, (28.10.2025)
 53. Ebert, D. (2022). *Daphnia* as a versatile model system in ecology and evolution. *EvoDevo*.
 54. OECD. (2004). Test No. 202: *Daphnia* sp. Acute Immobilisation Test. W: OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. OECD Publishing.
 55. OECD. (2012). Test No. 211: *Daphnia magna* Reproduction Test. W: OECD Guidelines for the

- Testing of Chemicals, Section 2. OECD Publishing.
56. Tkaczyk, A., Bownik, A., Dudka, J., Kowal, K., & Ślaska, B. (2021). *Daphnia magna* model in the toxicity assessment of pharmaceuticals: A review. Science of the Total Environment.
57. Antonio Vital, A. L., Liprandi, L., Laforsch, C., & Mair, M. M. (2025). Micro- and nanoplastic effects on the reproduction of *Daphnia* spp. – A meta-analysis. Environmental Toxicology and Chemistry.
58. Zhao, C. M., & Wang, W. X. (2011). Comparison of acute and chronic toxicity of silver nanoparticles and silver nitrate to *Daphnia magna*. Environmental Toxicology and Chemistry.
59. Hund-Rinke, K., Broßell, D., Eilebrecht, S., i in. (2022). Prioritising nano- and microparticles: Identification of physicochemical properties relevant for toxicity to *Raphidocelis subcapitata* and *Daphnia magna*. Environmental Sciences Europe.
60. Chapman, P. (1990). The sediment quality triad approach to determining pollution induced degradation. Science of the Total Environment.

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane biologiczne metody kontroli jakości środowiska wodnego z uwzględnieniem biotestów. Szczególną uwagę poświęcono muchówkom *Chironomus riparius* i rozwielitkom *Daphnia magna* jako przykładowym organizmom testowym. W pracy przedstawiono charakterystykę tych organizmów obejmującą ich cykl życiowy, cechy sprzyjające wykorzystaniu w kontroli jakości środowiska wodnego oraz rolę w łańcuchu pokarmowym. Opisano także ich wykorzystanie w testach toksyczności ostrej i przewlekłej oraz badaniach bioakumulacji substancji chemicznych. Ponadto, przedstawiono koncepcję Triady Jakości Osadów, zakładającej równoległe wykorzystanie analiz chemicznych, biotestów oraz monitoringu parametrów biologicznych in situ.

Słowa kluczowe: wody powierzchniowe, osady dennie, biotesty, *Chironomus riparius*, *Daphnia magna*.

Application of selected biotests in aquatic environment quality control

Abstract

This paper presents selected biological methods for aquatic environment quality control, with particular emphasis on biotests. Special attention is given to midges *Chironomus riparius* and water fleas *Daphnia magna* as example of test organisms. The paper presents the characteristics of these organisms, including their life cycle, features that favour their use in aquatic environment quality control, and their role in the food web. Their application in acute and chronic toxicity tests as well as in studies of bioaccumulation of chemical substances is also described. Furthermore, the concept of the Sediment Quality Triad is presented, which assumes the parallel use of chemical analyses, biotests, and in situ parameter biological monitoring.

Keywords: surface water, sediments, biotests, *Chironomus riparius*, *Daphnia magna*.

CURRENT ISSUES WITH THE EXPLOITATION OF FLUORITE DEPOSITS IN UKRAINE

1. Introduction.

The group of “feldspars” includes more than forty minerals, each possessing a wide range of unique physicochemical properties. Consequently, these minerals play a significant role in the chemical, metallurgical, glass, construction, jewellery, pharmaceutical, and other industries. Each mineral has been thoroughly studied and serves as an indispensable tool for the functioning of its respective industry. In modern conditions, where industries are increasingly focused on energy-efficient and environmentally safe technologies, the importance of feldspars as a raw material continues to grow. As a result, the global market of mineral raw materials shows steady growth. Analysis of statistical data from the National Minerals Information Centre of the USGS project [1] has shown that the main producers of feldspar mineral resources are Turkey, India, China, and Italy. Accordingly, these countries are the primary suppliers of this raw material worldwide. At the same time, imports of this raw material are increasing in countries where domestic reserves are limited or do not meet industrial demand. Ukraine, possessing significant feldspar potential in its subsoil, faces challenges related to the complexity of deposit development, which are influenced by energy security concerns and competition in global markets.

In the context of modern technological challenges and growing demand for mineral raw materials, study of the properties, genesis, and deposits of feldspars, especially strategically important fluorite, becomes particularly relevant. Investigating the mineralogical characteristics, formation conditions, and beneficiation potential of these minerals not only broadens scientific understanding of geological processes but also contributes to the efficient use of resources in industry.

Moreover, both feldspar as essential for glass (flux), ceramics (strength/durability), and other industries, and fluorite due to its use for green tech (solar, EVs, wind) and industrial uses (steel flux) are considered a critical raw material for the EU.

2. Analysis of studies and publications.

In Ukraine, at various times, certain deposits of the “feldspar” group have been developed [2]: the pegmatite deposit “Balka Velykoho Taboru”, the

Dubrynitske microgranodiorite deposit, deposits of alkaline kaolins in the Polonne-Baranivskiy ore district, areas of the Novakivska Maidan-Vilske alkaline kaolin deposit, feldspar-rich clays and feldspar crystalline rocks (granites, migmatites, plagiogranites, pegmatitoid granites), and others. The output of the mining industry forms the basis for supplying both the domestic and foreign markets. However, the country’s needs are not fully met by domestic raw materials. Consequently, the industry obtains the required mineral raw materials from abroad. According to data from the State Customs Service of Ukraine, the main minerals from the “feldspar” group reported at the state level include feldspar itself, leucite, nepheline, syenite, and fluorite. Figure 1 presents the results of the analysis of mineral raw material imports and exports over the years.

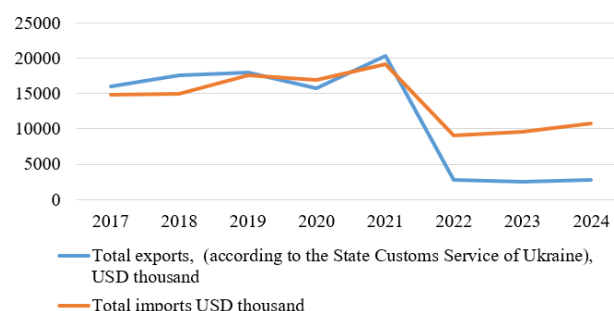


Figure 1 - Analysis of the import and export volumes of Ukraine for feldspar, leucite, nepheline, syenite, and fluorite for the years 2017–2024.

The analysis of economic indicators shows that before the full-scale Russian invasion of Ukraine, the export and import of raw materials were at the level of USD 15–20 million per year. However, with the onset of the full-scale invasion, the market sharply slowed down (exports decreased by 7.2 times, and imports decreased by 2.1 times) and has not yet returned to the previous volumes.

Among all the aforementioned feldspar minerals, only fluorite is classified as a strategic raw material at the national level. Fluorite (also known as fluorspar) is a mineral of notable economic and social importance. It is used in metallurgy as a flux additive to help remove sulphur and phosphorus, which are harmful to steel quality, into slags. Fluorite is also a

source of fluorine for water treatment and toothpaste production. It is used in the manufacture of nuclear fuel, enamel, glass, cement, and other products [3]. As early as 1994, by the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine [4], fluorite was designated as a mineral of national importance in such categories as “chemical raw material”, “flux raw material”, “optical and piezo-optical raw material”, and “industrial raw material”. Since this mineral has numerous potential applications, the same Resolution [4] stipulates that the specific use of each individual deposit is of national significance and is determined by the decision of the State Commission on Mineral Reserves.

In turn, in 2021, according to the “List of metallic ores and non-metallic minerals of strategic importance for sustainable economic development

and national defence” [5], fluorite is listed as one of the four minerals classified under the group of “Non-Metallic Minerals”. This underscores the importance of this raw material for the development of numerous industries in the country and for its post-war reconstruction; it also highlights the relevance of research aimed at assessing the current situation.

A review of the literature indicates a significant interest in the extraction and processing of fluorite. Primarily it concerns global reserves and their distribution. On a global scale, there are countries with large and high-quality fluorite deposits. According to literature analysis [1, 6], the leaders are Mexico and South Africa (Fig. 2).

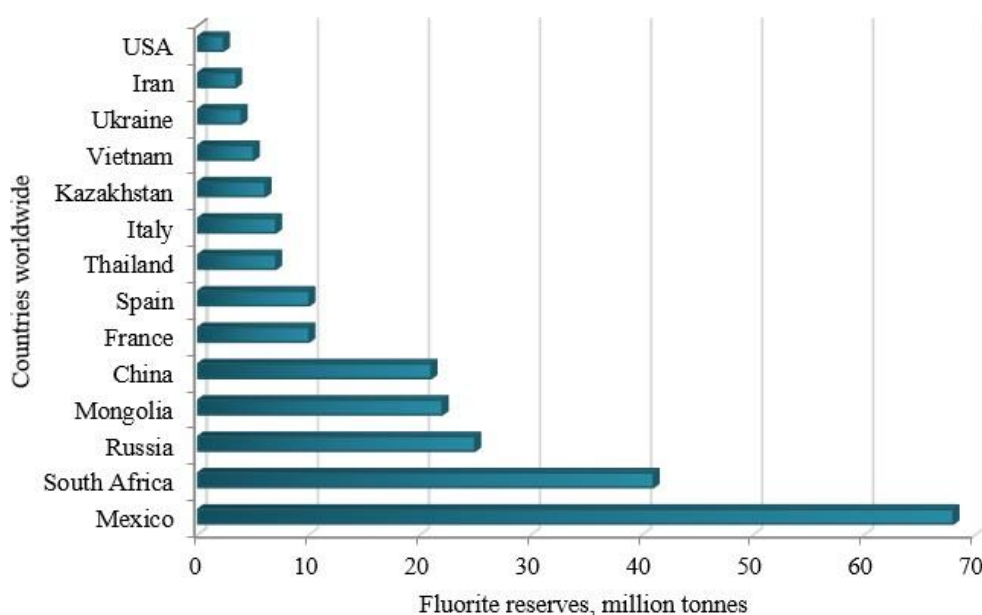


Figure 2 - Distribution of explored fluorite reserves by counties worldwide, million tonnes

The authors of the study [7] analyzed the global use of fluorite by its types. They found that in 2023, the world fluorite market was valued at USD 3.6 billion. The authors modelled the available extraction and production parameters and projected that by 2033, the market would reach USD 5.9 billion, corresponding to an average annual growth rate of 5.3% for the period from 2024 to 2033.

These forecasts are supported by the data from source [8]. In China, a decision was made to urgently construct its own mine to reduce dependence on the external market. Xinjiang Huayou Mining is developing a project to extract fluorite from the Kuerle deposit, with a planned launch at the end of the second quarter of 2025. The Kuerle fluorite reserves account for 10% of China’s explored fluorite reserves. Preliminary estimates indicate that the mining area contains up to 50 million tonnes of CaF_2 . The ore will

be mined using underground methods, and the mine’s operational life is expected to be 41 years.

In the study [9], 3D modelling was conducted to determine the morphology, volume, spatial distribution of the fluorite ore body, and ore content at Jbel Tirremi, located in northeast Morocco. The authors found that the average CaF_2 content is only 28.0%, while the calculated total resource amounts to 4.77 million tonnes. Analysis of the spatial distribution of the ore and its content, along with geotechnical studies, indicates that open-pit mining would allow the most efficient exploitation of the deposit. Flotation is expected to be the most effective method for ore extraction.

Rich fluorite deposits are rare, but considering its limited reserves and strategic importance, not only for our country, many specialists are conducting studies on low-grade fluorite deposits

and searching for beneficiation methods. For example, the authors of [10] used X-ray diffraction to determine the crystallographic parameters and structure of fluorite at the Yantuwaru Mining Site, Nigeria. The results showed variations in *Ca* content and low *F* concentrations in all fluorite samples due to the presence of *Ba* and *Br*, which led to the substitution of impurity ions in the fluorite lattice.

The authors of [11] proposed that the Bakhtynske deposit in Ukraine be developed using underground mining, as open-pit methods are economically and environmentally impractical. The mine has planned capacity of 500,000 tonnes of ore per year, allowing the mine to operate for 29 years. The processing plant is expected to produce approximately 65,000 tonnes of fluorite concentrate, 83,500 tonnes of high-quality ceramic feldspar, and 250,000 tonnes of quartz concentrate.

Considering global reactions to the shortage of mineral raw materials and active efforts to justify domestic extraction, processing, and use of fluorite, the objective of this work has been formulated: to substantiate the possibility of meeting the country's needs with its own raw materials.

3. The research techniques and methods.

To achieve the stated objective, research tasks were formulated, and methods were defined:

- 1) analysis of the current market to meet Ukraine's feldspar needs (monitoring the reporting data from Ukrainian state agencies, methods of statistical market analysis).
- 2) study of fluorite reserves and resources in the country's subsoil (analysis of the geological reference books, reports, maps, and atlases).

- 3) development of technological solutions for fluorite extraction (graphical-analytical method).

4. Results.

Compared to the world leaders in fluorite reserves (see Fig. 2), Ukraine has modest fluorite deposits. Analysis of geological reference books, maps, atlases, and publications [2, 3, 6, 12, 13] indicates the presence of no more than about two dozen small clusters of fluorite ore, i.e., ore occurrences, and only two deposits with confirmed reserves. According to geological experts, fluorite deposits are located within the junction zone of the Ukrainian Crystalline Shield and the Dnipro-Donets Basin, specifically within the following regions:

- **Vinnitsia Region:** Bakhtynske deposit; Novoselkivske, Skazynetske, Posukhivske, Perekorynske, Izrailivske, Mohyliv-Podilsk, Milkivske ore occurrences;
- **Donetsk Region:** Pokrovo-Kyryivske deposit; Dokuchaievsk, Karakubsk, Novotroitske ore occurrences;
- **Zhytomyr Region:** Tsentralne ore occurrence;
- **Kirovohrad Region:** Bobrynetske, Kompaniievsk, Pervozvanivsk ore occurrences;
- **Zaporizhzhia Region:** Konstantynopolske ore occurrence.

The conducted analysis allowed for compiling geological data on the reserves of deposits and the resources of ore occurrences, their sizes, and associated minerals necessary for the development of technological solutions (Table 1).

Table 1. Geological data on fluorite deposits and ore occurrences in Ukraine

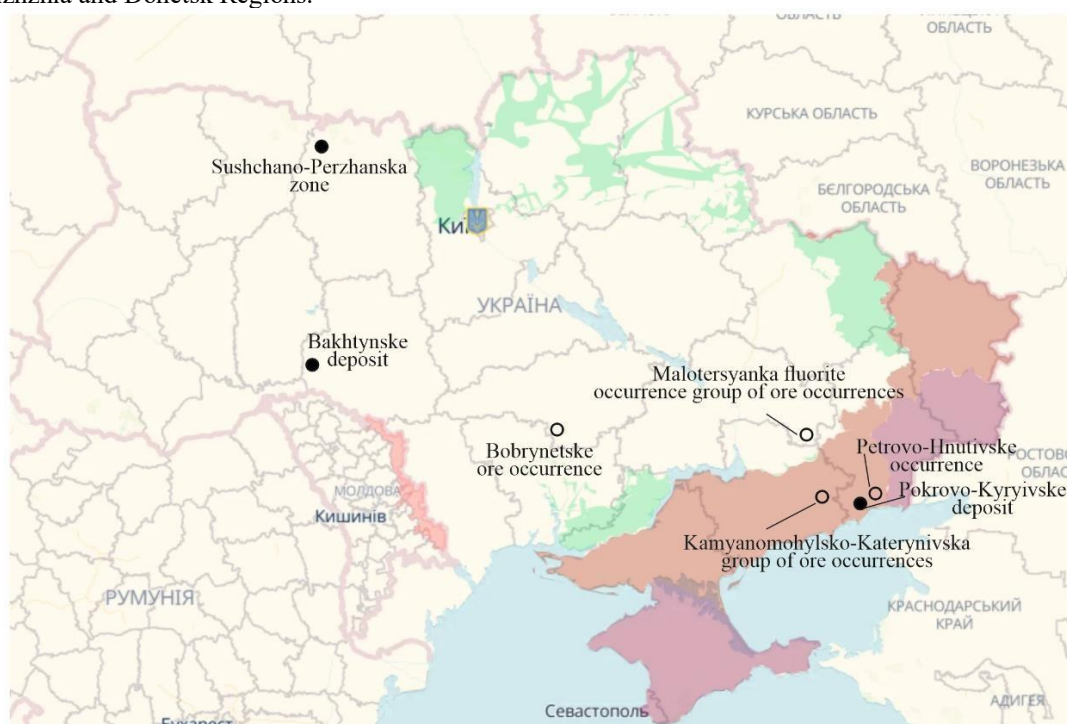
Deposit or occurrence and its origin	Dimensions, m	Fluorite content, %	Reserves and resources	Associated minerals and their content, %
Bakhtynske low-temperature hydrothermal	Depth is 21.3 – 118.5 m, length is 4000 – 9400 m, width is 1000 – 3500 m [3], thickness is 0.4 – 4.7 m [15, 11]	5 – 48.89% [15, 11] (according to the data [3] and [14] 11 – 41%)	Explored reserves are over 10 million tonnes, and the projected reserves are 100 million tonnes.	Potassium feldspar is up to 18.4%, quartz – 54.9% [14]
Pokrovo-Kyryivske medium-temperature hydrothermal deposit	Depth is 80 – 190 m, length is 250 m, width is 70 – 180 m [3], thickness is 4.4 – 80 (120) m [2, 13]	a) in carbonate–fluorite 38 – 71%, 73 – 83%. b) in carbonate–feldspar–fluorite 54.3 % [3].	2.227 million tonnes, including fluorite – 1.398 million tonnes	a) carbonates 20 – 45%, dolomite 5 – 10%, calcite, feldspars, quartz, ore minerals; b) feldspars 20 – 50%, carbonates 5 – 30% [14], rare-earth elements 1 – 8 g/t,

Tsentralne occurrence [16] belongs to high-temperature hydrothermal deposits	Area is 3000×500 m. Thickness is 0.003 – 25 m (layer)	from 1 – 2 to 53.8%	4 million tonnes of ore	strontium up to 1200 g/t. Feldspars – 28 – 65%, rare-earth elements – 0.125 – 0.18%, yttrium 0.035 – 0.061%
Bobrynetske occurrence [16]	Length is 4600 m; width is 800 m	3 – 27.6%	1.7 million tonnes of ore	Developed sulfide-polymetallic and copper-silver mineralization
Petrovo-Hnutivske occurrence [16]	Strike is 270 m, thickness is 0.5 – 2.85 m			
Vyshcheolchedaiivske occurrence [14]	Veins of 1–2 cm. The thickness of the zone of vitrified sandstone near the cracks is 5–10 cm (up to 25–50 cm).	25 – 30% (in veins)		Calcite, sandstones
Skazynetske occurrence [16]	Thickness is up to 2.5 m	On average 15%		Sandstones

The analysis of the collected geological data indicates that:

1) The geographical distribution of deposits and ore occurrences is concentrated in five regions of Ukraine. They extend from the north of the country in the Sushchano-Perzhanska zone in Zhytomyr Region, through the central part of the country in Vinnytsia and Kirovohrad Regions, to the southeast in Zaporizhzhia and Donetsk Regions.

2) Ukraine has only two deposits with confirmed reserves. These are the Pokrovo-Kyryivske deposit in Donetsk Region and the Bakhtynske deposit in Vinnytsia Region. The Pokrovo-Kyryivske deposit and the Kamyanomohylsko-Katerynivska group of ore occurrences are currently located within the occupied territory (Fig. 3).



Legend: ● – fluorite deposit; ○ – ore occurrence; ■ – occupied territory
Figure 3 – Schematic map of the locations of fluorite deposits and ore occurrences in Ukraine

3) According to the geological parameters, there are classifications based on CaF_2 content. Deposits are distinguished as [13]: high-grade ores (the content is over 50%), medium-grade ores (35–50%), and low-grade ores (less than 35%). According to this classification, the carbonate-fluorite ores of the Pokrovo-Kyryivske deposit are considered high-grade, with fluorite content up to 83%, whereas the ores of the Bakhtynske deposit can only be classified as medium-grade, with natural fluorite content limited to 48.89%. All other ore occurrences have fluorite content within 20–30%, to be classified as low-grade deposits.

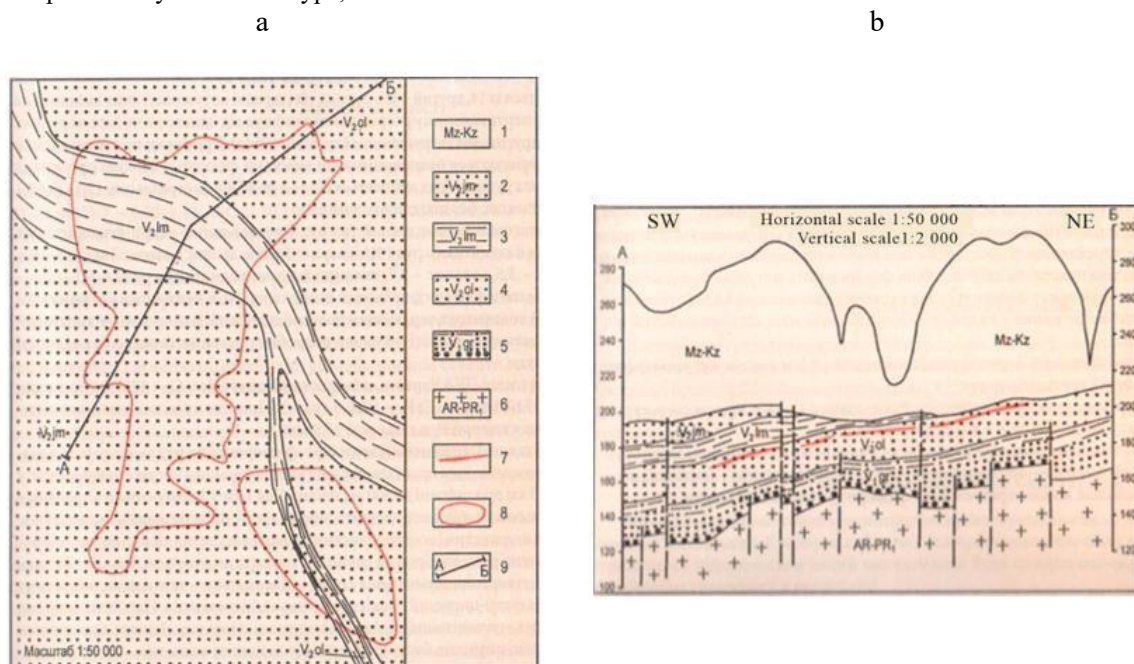
4) Based on the reserve size, fluorite deposits are categorized as follows: small – 0.5–2 million tonnes, medium – 2–5 million tonnes, large – 5–10 million tonnes, and very large – over 10 million tonnes [13]. Accordingly, the Bakhtynske deposit, based on the explored reserves, belongs to large deposits; however, according to the projected reserves, it can be considered very large. In contrast, the Pokrovo-Kyryivske deposit, despite its high-grade ores, is considered small on a global scale, as it contains less than 1.5 million tonnes of fluorite in the explored reserves. Of particular interest is the Tsentralne ore occurrence, which is classified as medium in terms of reserves and contains fluorite ores of medium grade (according to the previous classification).

5) A distinctive feature of the Pokrovo-Kyryivske deposit is that it belongs to a medium-temperature hydrothermal type, which includes rare-

earth formations. This is confirmed by the content of rare-earth elements (see Table 1).

Thus, at present, there are only two explored deposits. The first, the Pokrovo-Kyryivske deposit, is rich in fluorite but small in terms of reserves and, most importantly, is located within the occupied territory for an indefinite period. The second, the Bakhtynske deposit, has medium-grade ore but, based on explored reserves, belongs to large deposits and is located within the territory under Ukrainian control. Therefore, the Bakhtynske deposit is the main potential source of mineral raw material in the country.

According to the geological data (see Table 1), the deposit has an elongated shape, with its length in plan ranging from 4,000 to 9,400 m and its width from 1,000 to 3,500 m (Fig. 4a). The depth of the deposit is relatively shallow, ranging from 21.3 to 118.5 m (Fig. 4b). Analysis of the geological plan and cross-section [17] indicates that almost the entire deposit lies at a depth of 100–120 m, while two separate areas have a cover of approximately 20 m. Examination of the terrain using Google Maps shows that two ravines intersect the area under consideration.



1 – Meso-Cenozoic deposits; 2 – sandstones; 3 – argillites; 4 – sandstones; 5 – siltstones, sandstones, gravelites; 6 – crystalline basement; 7 – ore bodies; 8 – general outline of the deposit; 9 – cross-section line

Figure 4 – Schematic geological map (a) and cross-section (b) of the Bakhtynske fluorite deposit [16]

The rational selection of a mining method is a key stage in the design of mining enterprises. Open-pit (open-pit mine) and underground (shaft) mining methods each have their advantages, limitations, and areas of application, which are determined by geological, techno-economic, and environmental factors. Typically, open-pit mining is applied when the mineral occurs at a shallow depth, under

favourable hydrogeological conditions, and with a sufficient area for development. In contrast, underground mining is appropriate for deep deposits or in cases where open-pit mining is economically or environmentally impractical. Each of these methods has its own advantages and disadvantages (Table 2).

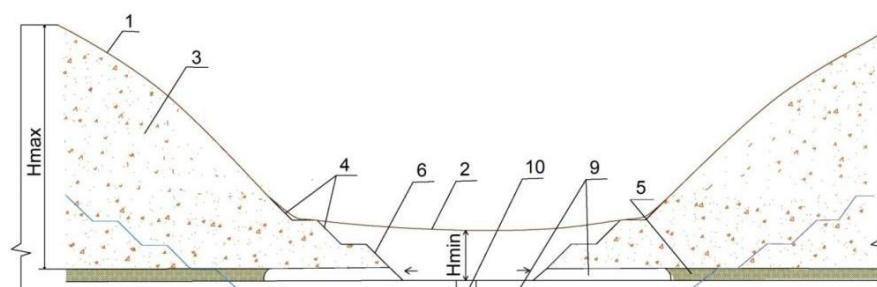
Table 2 – Assessment of a mining method

Mining method	Advantages	Disadvantages
Open-pit	– shorter time for open pit construction; – lower construction costs; – higher production capacity of the enterprise and the possibility of using more productive equipment; – more complete extraction of the mineral; – possibility of applying selective mining; – lower risks and safer working conditions; – easier to implement automated systems, including the use of unmanned equipment.	– large volumes of overburden excavation; – allocation of large land areas for external dumps; – disruption of the soil cover, requiring reclamation after completion of work; – limited depth of extraction; – environmental pollution: dust, noise, depression funnel, landscape disruption, etc.
Underground	– extraction at great depths; – lower impact on the ecosystem: preservation of the landscape and soil cover, protection of groundwater, absence of dust and noise at the surface; – small amount of overburden during underground workings, resulting in smaller volumes of external dumps.	– high construction costs and long construction time; – limitations on the production capacity of the enterprise; – inability to fully extract the mineral; – more complex conditions for selective mining; – worse conditions in terms of worker safety and health: collapses, dust and gases, lighting, ventilation; – risks of subsidence and ground surface collapse.

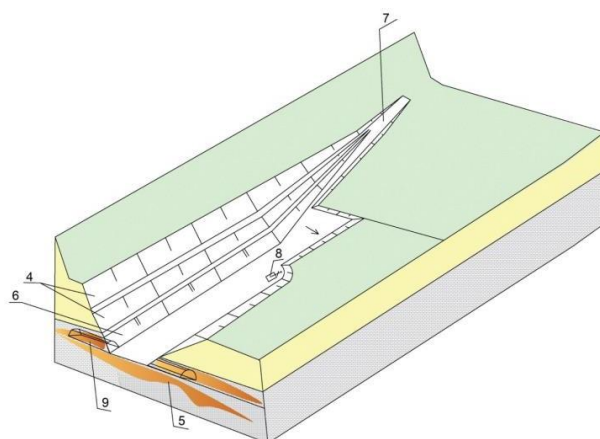
In our case, for the development of the Bakhtynske deposit, a combined use of both methods is appropriate. It means that open-pit mining would be used during the initial stages of development, while underground mining would be applied to deeper levels. A preliminary detailed analysis of the geological conditions of the deposit indicates that two ravines (see Fig. 4) intersect the surface of the deposit. According to geological survey data, the minimum depth of the deposit is 21.3 m. Therefore, it is proposed to expose the ore layer using trenching

along the ravine. The construction of the open pit includes three working levels, of which the two upper levels 4 are overburden layers, and the third, lower level 6 is the ore one (i.e., the extractable layer). However, ore extraction at the open-pit stage is limited by the floor size of the open pit field, resulting in a very small volume. The main extraction of the mineral 5 will be carried out by underground mining (Fig. 5).

a)



b)



1 – ground surface; 2 – ravine thalweg; 3 – overburden; 4 – overburden levels; 5 – ore layer; 6 – mining level; 7 – trench cut; 8 – excavator; 9 – drifts

Figure 5 – Diagram of the combined open-pit and underground development of the deposit

The transition from open-pit to underground mining of a deposit is a complex and multi-stage process that requires careful planning, technical substantiation, and phased implementation. The dimensions of the open pit at its lower part are calculated based on the required parameters of the construction site and maintenance of the underground workings.

The design of the underground section includes:

- Development of a general plan for the underground workings.
- Determination of the locations for the openings of horizontal workings for the ore layer already exposed by open-pit mining as well as inclined shafts to the deeper ore level.
- Design of ventilation, dewatering, and power supply systems.
- Selection of the method for mineral transportation (mine cars, conveyors).

Construction of underground infrastructure is more complex as it requires excavation and reinforcement of mine workings (lining, concreting, supports); for complex ventilation schemes, additional shafts from the surface may be needed; installation of ventilation equipment, pumping stations, and lighting systems; and mandatory implementation of systems for monitoring the geomechanical condition of the rock mass.

This approach to deposit exposure and development allows:

- Optimization of extraction costs.
- Flexible response to changes in geological and mining conditions in case of ore layer pinch-outs.
- Reduction of environmental impact.

The selection of mining method should be based on a comprehensive analysis of the geological structure of the deposit, economic feasibility, technical capabilities, and environmental risks. Modern trends in mining focus on the integration of technologies, increasing efficiency, and reduction of negative environmental impact.

5. Conclusions.

The analysis of economic indicators for Ukraine's import and export of feldspar, leucite, nepheline, syenite, and fluorite from 2017 to 2024 shows that prior to the full-scale Russian invasion, export and import of these raw materials were at the level of USD 15–20 million per year. However, with the onset of the full-scale invasion, the market sharply declined (exports decreased by 7.2 times, imports – by 2.1 times), and it has not yet recovered to previous volumes. Considering the complexity of the situation in the country, state policy is focused on meeting industrial needs domestically.

Ukraine has only two explored fluorite deposits. The first, the Pokrovo-Kyryivske deposit, is

rich in fluorite but small in terms of reserves and, most importantly, is located within the occupied territory for an indefinite period. The second, the Bakhtynske deposit, has medium-grade ore, and based on the explored reserves, belongs to large deposits and is located within the territory under Ukrainian control. Therefore, the Bakhtynske deposit is the main potential source of mineral raw material in the country.

The selection of mining method is based on a comprehensive analysis of the geological structure of the deposit, economic feasibility, technical capabilities, and environmental risks. Modern trends in mining focus primarily on reducing negative environmental impact. Analysis of the geological exploration data for the Bakhtynske deposit substantiated the use of a combined open-pit and underground method. It means that the ore layer would be exposed using trenching along the ravine where the ore layer lies at its shallowest depth. The construction of the open-pit mine will include three levels, of which the two upper levels are overburden layers, and the third, lower level is the ore one (i.e., an extractable layer). Ore extraction will then be carried out using underground mining methods.

6. Acknowledgements.

This work was carried out within the framework of the Polish-Ukrainian project “Justification of the circular economy model of a mining enterprise with man-made raw materials”, implemented under the Agreement on Scientific Cooperation between the Polish Academy of Sciences and the National Academy of Sciences of Ukraine for 2025–2027. Special thanks are extended to Professor, Doctor of Geological Sciences Volodymyr Baranov for his advice and valuable information regarding the geological structure of the deposit.

References

1. **National minerals information center.** USGS. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/commodity-statistics-and-information>
2. Plotnikov O.V., Kurylo M.M. & Ozerko V. (2022). Complex deposits as the main source of feldspar raw materials for modern technologies, *Mining Journal of Kryvyi Rih National University* Vol. 20, No. 1, pp. 154-161. URL: <https://miningjournal.com.ua/web/uploads/pdf/Mining%20Journal%20of%20Kryvyi%20Rih%20National%20University,%20Vol%2020,%20No%201-154-161,%202022.pdf>
3. **Non-metallic mineral resources of Ukraine: Textbook** / V.A. Mykhailov et al. Kyiv: Publishing centre “Kyiv University”. 2007. 507 pp. URL: https://www.geology.knu.ua/media/library/docs/RKK_nemetalichni_kk.pdf
4. **Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 827 of December 12, 1994, “On the approval of lists of minerals of national and local importance.”** URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-94-%D0%BF#Text%20dofollow>
5. **Decision of the National Security and Defense Council of Ukraine of July 16, 2021, “On stimulating the exploration, extraction, and processing of minerals of strategic importance for sustainable economic development and national defense.”**
6. Geography of mineral resources of Ukraine: Monograph / Myroslav Syvyi, Ihor Paranko, Yevhen Ivanov. Lviv: Prostrir M. 2013. 684 pp. <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/10/42320198.pdf>
7. Fluorite Market: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2024-2033. Report Code: A03979, Pages: 285. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/fluorite-market>
8. **Nina Hu.** (2025). Fluorspar supply tightness to ease in China; demand to rise from booming ESS sector | 2025 preview. Fastmarkets. URL: <https://www.fastmarkets.com/insights/fluorspar-supply-tightness-to-ease-in-china-demand-to-rise-from-booming-ess-sector-2025/>
9. Mohammed, Cherai & Rddad, Larbi & Talbi, Fouad & Carranza, Emmanuel John. (2023). 3D modeling for mineral resource assessment of fluorite ore and its industrial application in Jbel Tirremi, northeast Morocco. *Modeling Earth Systems and Environment*. 9. 10.1007/s40808-022-01684-0. URL: https://www.researchgate.net/publication/366951583_3D_modeling_for_mineral_resource_assessment_of_fluorite_ore_and_its_industrial_application_in_Jbel_Tirremi_northeast_Morocco
10. Shehu, Gidado & Bagudo, Ibrahim. (2023). Mineralogical and Structural Analyses of Natural Fluorite from Yantuwuru Mining Site, Nigeria. *UMYU Scientifica*. 2. 43-51. 10.56919/usci.2123.007. URL: https://www.researchgate.net/publication/370064672_Mineralogical_and_Structural_Analyses_of_Natural_Fluorite_from_Yantuwuru_Mining_Site_Nigeria
11. Shepel I.V., Kuzmenko S.M. On the level of exploration of the Bakhtynske fluorite deposit // *Mineral Resources of Ukraine*. 2002. No. 1. Pp. 20-22.
12. Ryabokon, Tamara & Shevchenko, Tetiana & Shekhunova, Stella & Stadnichenko, Svitlana. (2022). Lithostratigraphic features of the Mesozoic section of the joint zone of the northeastern slope of the Ukrainian Shield and

- the Dnipro-Donets Depression. Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine. 15. 8-43. DOI:10.30836/igs.2522-9753.268262
14. [Electronic resource]. Access mode: <https://insgeo.com.ua/fluoryt/>
 15. Strategic mineral resources of Ukraine and their investment attractiveness: Monograph / V.A. Mykhailov. Kyiv: Publishing and printing center. "Kyiv University". 2023. 371 pp. [16] with illustrations. URL: http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Stratehichni_Korysni_Kopalyny.pdf
 16. Zhovinsky E.Ya. Geochemistry of fluorine in sedimentary formations of the southwest of the East European platform. Kyiv: Naukova Dumka. 1979. 199 pp.
 17. Mykhailov V.A., Kurylo M.M. Mineral raw material base of flux raw materials of Ukraine. Kyiv: Nika-Centre. 2010. 198 pp. URL: http://www.geol.univ.kiev.ua/public/oredep/minearl_base_flux_Ukraine.pdf
 18. Hursky D.S. et al. (2006). Metallic and non-metallic mineral resources of Ukraine. Volume II. Non-metallic mineral resources. Kyiv-Lviv: Publishing centre "Tsentr Yevropy". 552 pp.
 19. State Customs Service of Ukraine – [Electronic resource]. – Available at: <https://customs.gov.ua/>. – Title from screen.

Streszczenie

Poddano analizie surowce należące do grupy skaleni i występujące w Ukrainie. Na podstawie danych pochodzących z Państwowej Służby Celnej Ukrainy określono ogólne wskaźniki eksportu i importu skaleni, leucytu, nefelinu, syenitu oraz fluorytu w latach 2017–2024. Analizowano strukturę geograficzną występujących zasobów fluorytu na świecie, oraz szczegółowo zaprezentowano dostępne złoża i wystąpienia fluorytu (surowca strategicznego) na terenie Ukrainy. Omówiono warunki geologiczne, wskaźniki jakości rudy w złożach oraz opublikowane dane dotyczące zasobów. Dokonano również analizy wymiany zagranicznej przed i po okresie wojny. Przeprowadzono analizę technicznych, ekonomicznych oraz środowiskowych warunków i parametrów różnych wariantów eksploatacji złoża Bakhtynske. Wskazano główne zalety i wady eksploatacji odkrywkowej w porównaniu z podziemną. Uzasadniono także możliwość zastosowania kombinowanej metody wydobywania odkrywkowo-podziemnego.

Słowa kluczowe: fluoryt, skalenie, Ukraina, eksport, import,

Abstract

The Ukrainian market for minerals belonging to the feldspar group was studied. General indicators of export and import of feldspar, leucite, nepheline, syenite, and fluorite for 2017–2024 were determined based on the data from the State Customs Service of Ukraine. The global distribution of explored fluorite reserves by country was analyzed. The status of the strategic mineral fluorite was examined in detail: the available deposits and ore occurrences in Ukraine, conditions of occurrence, ore quality indicators at the deposits, and published figures on reserves were reviewed. An analysis was made regarding the export and import before and after war.

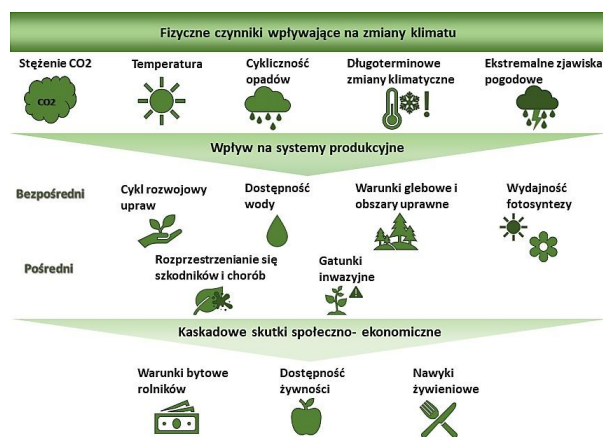
Technical, economic, and environmental conditions and parameters were analyzed for various development options of the Bakhtynske deposit. The main advantages and disadvantages of open-pit versus underground mining were outlined. The feasibility of using a combined open-pit and underground mining method was substantiated.

Keywords: fluorite, feldspar, Ukraine, export, import,

Gospodarka o obiegu zamkniętym jako kluczowy czynnik strategicznej konkurencyjności gospodarstw rolnych

1. Wprowadzenie.

Współczesne rolnictwo stoi przed wieloma wyzwaniami zarówno na poziomie krajowym, jak i globalnym. Zmiany klimatyczne, postępująca globalizacja, rosnące wymagania konsumentów oraz dynamiczny rozwój technologii wpływają na sposób funkcjonowania przedsiębiorstw rolnych. Sektor rolny odgrywa kluczową rolę w gospodarce i społeczeństwie, nie tylko zapewniając bezpieczeństwo żywnościowe, ale także będąc istotnym elementem zrównoważonego rozwoju. Według raportu Europejskiej Agencji Środowiska (EEA) z 2020 roku zmiany klimatyczne mogą doprowadzić do utraty nawet 16% dochodów z rolnictwa w Unii Europejskiej do 2050 roku. Podczas gdy północ Europy może czerpać pewne korzyści z wydłużonego okresu wegetacji, południe i inne regiony będą zmagać się z ekstremalnymi zjawiskami pogodowymi, takimi jak susze, upały czy powodzie, które obniżają rentowność gospodarstw rolnych (European Environment Agency, 2020).



Rysunek 1. Wpływ zmian klimatu na rolnictwo.

Źródło: European Environment Agency (2020)

Podobne wyzwania dotyczą również Stanów Zjednoczonych. Raport amerykańskiego Departamentu Rolnictwa (USDA) wskazuje, że rolnictwo w USA jest coraz bardziej narażone na długotrwałe susze na Środkowym Zachodzie oraz intensywne huragany na południu. Degradacja gleby, niedobór wody oraz wzrost liczby

ekstremalnych zjawisk pogodowych negatywnie wpływają na plony i stabilność cen żywności (USDA, 2020).

Z kolei w Polsce rolnicy zmagają się z nierównomiernym rozkładem opadów, wzrostem zagrożeń fitosanitarnych oraz koniecznością dostosowania się do unijnych norm zrównoważonego rozwoju. Wahania plonów i wzrost kosztów produkcji wymagają wdrażania nowych strategii, które pozwolą na utrzymanie konkurencyjności na rynku krajowym i międzynarodowym (DODR, 2019).

W tym kontekście kluczowym zagadnieniem staje się strategiczna konkurencyjność przedsiębiorstw rolnych, czyli ich zdolność do efektywnego konkutowania poprzez wykorzystanie przewag konkurencyjnych, takich jak innowacyjność, jakość produktów, efektywność kosztowa czy zdolność adaptacji do zmieniającego się otoczenia. Istotnym elementem tej konkurencyjności jest także wdrażanie zasad Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ), które pozwala na optymalizację zasobów, redukcję odpadów i zwiększenie efektywności produkcji w sposób zrównoważony. W ujęciu modelu pięciu sił Portera, konkurencyjność sektora rolnego kształtują m.in. zagrożenie nowymi konkurentami, siła negocjacyjna dostawców i nabywców, zagrożenie substytutami oraz intensywność rywalizacji w branży (Porter, 2000). W warunkach globalizacji i zmian regulacyjnych zdolność dostosowania się do nowych realiów rynkowych staje się kluczowa dla przetrwania i rozwoju gospodarstw rolnych.

Rynki rolne w krajach Unii Europejskiej (w tym w Polsce) oraz w Stanach Zjednoczonych różnią się pod względem struktury gospodarstw, regulacji prawnych, poziomu wsparcia rządowego oraz warunków klimatycznych. W Europie kluczową rolę odgrywa Wspólna Polityka Rolna (WPR), która zapewnia dotacje i wprowadza regulacje środowiskowe. Z kolei w USA rynek charakteryzuje się wysoką mechanizacją, dominacją dużych gospodarstw towarowych oraz silnym nastawieniem na eksport. W Polsce przeważają mniejsze gospodarstwa rodzinne, które muszą dostosować się do unijnych norm, jednocześnie mierząc się ze zmiennymi warunkami klimatycznymi i

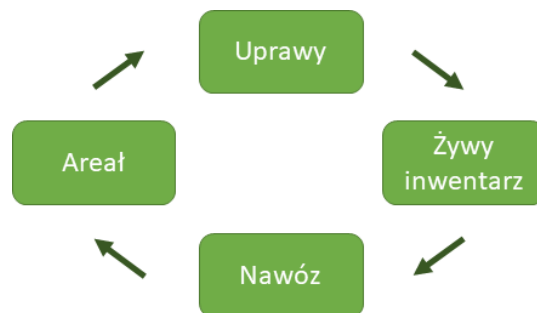
ekonomicznymi. W obliczu tych wyzwań kluczowe znaczenie zyskują innowacje technologiczne oraz strategie zrównoważonego rozwoju, które pozwalają utrzymać konkurencyjność i stabilność sektora rolnego.

Celem niniejszego artykułu jest analiza znaczenia Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ) jako kluczowego czynnika strategicznej konkurencyjności gospodarstw rolnych w Polsce, Unii Europejskiej i Stanach Zjednoczonych. Zostaną omówione istotne różnice w strukturze rynków rolnych: w USA dominują wielkie, zmechanizowane gospodarstwa towarowe, w Unii Europejskiej obserwujemy większą różnorodność, gdzie obok dużych firm rolnych występuje także wiele średniej wielkości gospodarstw, natomiast w Polsce przeważają mniejsze, rodzinne gospodarstwa rolne. Szczególna uwaga zostanie poświęcona roli innowacji technologicznych i strategii GOZ w zwiększaniu konkurencyjności tych różnych typów gospodarstw rolnych, które muszą zmagać się z odmiennymi wyzwaniami – od zmian klimatycznych po różnice w dostępie do technologii i finansowania. W warunkach rosnącej konkurencji oraz zmieniających się oczekiwań konsumentów, wdrożenie zasad GOZ staje się fundamentem rozwoju zrównoważonego oraz istotnym elementem budowania przewagi rynkowej dla współczesnych gospodarstw rolnych.

2. Gospodarka o obiegu zamkniętym jako czynnik konkurencyjności gospodarstw rolnych – przegląd literatury.

Gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ) w ostatnich latach stała się centralnym elementem debaty nad zrównoważonym rozwojem rolnictwa i jego konkurencyjnością. W literaturze podkreśla się, że GOZ nie tylko odpowiada na wyzwania środowiskowe, ale również może istotnie zwiększyć efektywność i strategiczną pozycję gospodarstw rolnych na rynku (Hamam et al., 2021).

Rolnictwo, jako sektor silnie uzależniony od zasobów naturalnych, ma duży potencjał w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Biogospodarka, będąca jej istotnym elementem, oferuje praktyczne i łatwe do wdrożenia rozwiązania, takie jak pełne zagospodarowanie pozostałości biomasy, wykorzystanie nieużytków do produkcji pasz czy stosowanie nawozów naturalnych zamiast chemicznych (Kulczycka & Pedziwiatr, 2019).



Rysunek 2. Podstawowy cykl cyrkulacji w sektorze rolno-spożywczym.

Źródło: Kulczycka & Pedziwiatr (2019).

Rozwijają się również technologie, jak biogazownie i biorafinerie, przetwarzające odpady rolnicze na energię. Coraz większe znaczenie mają też lokalne modele sprzedaży bezpośredniej oraz gospodarka współdzielenia, które ograniczają marnowanie żywności i zwiększają efektywność łańcucha dostaw. W Polsce regiony takie jak Warmia i Mazury, Podkarpacie czy Podlasie mają szczególnie dobre warunki do wdrażania takich rozwiązań. GOZ w rolnictwie stwarza realną szansę na bardziej zrównoważoną i odporną produkcję rolną (Kulczycka & Pedziwiatr, 2019).

Badania wskazują, że wdrażanie rozwiązań GOZ – takich jak odzysk i ponowne wykorzystanie odpadów organicznych, zamykanie obiegów składników odżywczych czy ograniczanie zużycia surowców pierwotnych – prowadzi do zwiększenia samowystarczalności gospodarstw, poprawy jakości gleby i zmniejszenia kosztów produkcji (Hamam et al. 2023).

Z perspektywy strategicznej konkurencyjności, GOZ sprzyja budowaniu długoterminowych przewag konkurencyjnych. Gospodarstwa wdrażające modele cyrkularne mogą tworzyć wartość dodaną poprzez innowacyjne produkty (np. nawozy organiczne, bioenergia, alternatywne pasze), a także obniżyć ryzyka związane z niestabilnością cen surowców i regulacjami środowiskowymi (García-Granero et al., 2025). Co więcej, implementacja praktyk GOZ jest coraz częściej wspierana przez instrumenty polityki unijnej, takie jak strategia „Od pola do stołu” (European Commission, 2020), co dodatkowo zwiększa ich atrakcyjność ekonomiczną.

Współczesne badania podkreślają także potrzebę mierzenia stopnia circularności gospodarstw rolnych. W tym kontekście rozwijane są ramy i wskaźniki oceny GOZ – zarówno

środowiskowe, jak i ekonomiczne – co umożliwia lepsze zarządzanie i benchmarking w skali mikro (Rodino et al., 2023). Rodino (2023) zwracają uwagę na konieczność holistycznego podejścia do oceny konkurencyjności – łączącego zasobooszczędność, regenerację i redukcję emisji z analizą kosztów operacyjnych i elastyczności gospodarstw wobec szoków rynkowych.

Literatura ukazuje również wyłaniające się technologie wspierające GOZ, takie jak cyfrowe platformy zarządzania obornikiem, precyzyjne systemy nawożenia czy biotechnologie wykorzystujące mikroalgi i odpady jako surowce (Soliwoda, Wieliczko & Kulawik, 2020). Te innowacje, choć wymagają inwestycji początkowych, prowadzą do zwiększenia produktywności i odporności gospodarstw, co bezpośrednio przekłada się na ich konkurencyjność.

Wreszcie, przegląd porównawczy różnych systemów rolniczych wskazuje, że gospodarstwa stosujące strategie ekologiczne, regeneracyjne i oparte na GOZ osiągają lepsze wyniki w zakresie trwałości ekonomicznej i społecznej, a także charakteryzują się większą zdolnością adaptacyjną do zmian klimatycznych i rynkowych (Constantin et al., 2022).

Podsumowując, literatura naukowa jednoznacznie wskazuje, że gospodarka o obiegu zamkniętym stanowi nie tylko narzędzie ekologizacji produkcji rolnej, ale przede wszystkim strategiczny czynnik budowania trwałej konkurencyjności gospodarstw rolnych – poprzez

innowacje, efektywność zasobową, redukcję kosztów i lepsze dostosowanie do polityki klimatyczno-środowiskowej.

3. Czynniki wpływające na strategiczną konkurencyjność gospodarstw rolnych.

Regulacje prawne, zarówno krajowe, jak i międzynarodowe, zmuszają przedsiębiorstwa rolne do dostosowywania swoich metod produkcji do norm ekologicznych. Obejmuje to m.in. ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, kontrolę stosowania nawozów i pestycydów, a także wprowadzanie nowych norm środowiskowych. Te zmiany niosą ze sobą zarówno wyzwania, jak i szanse. Wzrost świadomości konsumentów, którzy coraz częściej poszukują produktów ekologicznych i zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju, stawia rolników przed koniecznością dostosowania swoich praktyk produkcyjnych.

Współczesna konkurencyjność sektora rolniczego opiera się nie tylko na kosztach produkcji, ale także na innowacyjności, efektywności wykorzystania zasobów, w tym surowców wtórnych oraz zdolności adaptacji do dynamicznie zmieniających się warunków rynkowych i środowiskowych.

Szczegółową analizę czynników wpływających na konkurencyjność rolnictwa w kontekście zrównoważonego rozwoju przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Analiza czynników wpływających na konkurencyjność rolnictwa w kontekście zrównoważonego rozwoju.

Czynniki	Charakterystyka	Wpływ na konkurencyjność	Przepisy prawne	Źródło
Zmiany klimatyczne	Zmiany temperatury, opadów, wzrost częstotliwości ekstremalnych zjawisk pogodowych (susze, powodzie).	Zwiększają niestabilność plonów, zmniejszają jakość upraw. Rolnicy muszą adaptować się do zmieniających się warunków klimatycznych.	USA: Clean Air Act, Federal Energy Regulatory Commission (FERC). UE: Europejski Zielony Ład (Green Deal). PL: Ustawa o ochronie środowiska.	(Kolpiński, Kowalski i Nowak, 2022)
Normy ekologiczne i polityki	Wzrost wymagań dotyczących ochrony środowiska	Zmiany wymuszają inwestycje w ekologiczną produkcję,	USA: Clean Water Act, National Environmental Policy	(Osińska, 2024)

<i>zrównoważonego rozwoju</i>	(emisje gazów cieplarnianych, kontrola nawozów i pestycydów).	co może zwiększyć konkurencyjność w odpowiedzi na rosnący popyt na produkty ekologiczne.	Act (NEPA). UE: Dyrektywa Nitrates, Rozporządzenie (EU) 2020/852 (Green Taxonomy). PL: Ustawa o nawozach i nawożeniu.	
<i>Koszty produkcji i efektywność gospodarowania zasobami</i>	Optimalizacja zużycia wody, energii, nawozów; zmniejszanie odpadów.	Zwiększa rentowność, umożliwia konkurencję na rynkach globalnych poprzez obniżenie kosztów operacyjnych i redukcję ryzyka cenowego.	USA: Agricultural Act of 2014 (Farm Bill), U.S. Energy Policy Act. UE: Rozporządzenie (EU) 2020/741 (Energy Efficiency). PL: Ustawa o odnawialnych źródłach energii.	(Kłak, Zawisza i Osińska, 2023)
<i>Globalna konkurencja i zapotrzebowanie na produkty ekologiczne</i>	Rosnąca świadomość konsumentów i wzrost zapotrzebowania na produkty ekologiczne.	Wymusza na rolnikach adaptację do metod zrównoważonej produkcji. Produkty ekologiczne cieszą się wyższymi cenami, co zwiększa rentowność.	USA: Organic Food Production Act (OFPA). UE: Rozporządzenie (EC) No. 834/2007 w sprawie produkcji ekologicznej. PL: Ustawa o rolnictwie ekologicznym.	(Osińska, 2024)
<i>Innowacje technologiczne w rolnictwie</i>	Nowoczesne technologie jak rolnictwo precyzyjne, automatyzacja procesów, monitorowanie upraw.	Pozwalają na optymalizację produkcji, zmniejszają zużycie zasobów i wpływ na środowisko, podnosząc efektywność i jakość plonów.	USA: U.S. Agricultural Innovation Act. UE: Horizon Europe (Program badań i innowacji). PL: Program Operacyjny Polska Wschodnia.	(Kłak, Zawisza i Osińska, 2023)
<i>Zrównoważona gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ)</i>	Recykling odpadów, ponowne wykorzystywanie zasobów w produkcji rolniczej.	Redukuje koszty operacyjne, poprawia efektywność procesów, wspiera zrównoważoną produkcję, co podnosi konkurencyjność firm.	USA: Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). UE: Dyrektywa o gospodarce odpadami (2008/98/WE). PL: Ustawa o gospodarce odpadami.	(Kolpiński, Kowalski i Nowak, 2022)

Źródło: Opracowanie własne

Organizacje, które uwzględniają te zmienne w swoich strategiach i są gotowe do ich adaptacji, będą w stanie zbudować silną pozycję konkurencyjną. Wdrażanie zasad Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ), które pozwalają na efektywne wykorzystanie zasobów, redukcję odpadów i minimalizację negatywnego wpływu na

środowisko, staje się kluczowym elementem tego procesu. Zrozumienie i skuteczne reagowanie na zmieniające się warunki rynkowe i środowiskowe, w tym integracja GOZ, stanowi fundament konkurencyjności w rolnictwie, umożliwiając przedsiębiorstwom dynamiczny rozwój w coraz bardziej wymagającym otoczeniu.

4. Charakterystyka gospodarstw rolnych i przykłady wdrażania GOZ w rolnictwie.

W kontekście rolnictwa, podobnie jak w innych branżach, konkurencyjność przedsiębiorstw jest kluczowym czynnikiem dla ich rozwoju i utrzymania na rynku. Wzrost konkurencji oznacza, że przedsiębiorstwa muszą poszukiwać nowych sposobów na poprawę efektywności, innowacyjności i rentowności. W związku z tym, zapewnienie przewagi konkurencyjnej staje się niezbędne, a wdrażanie zrównoważonych technologii, takich jak Gospodarka o Obiegu Zamkniętym (GOZ), może stanowić jedną z dróg do jej osiągnięcia. GOZ umożliwia minimalizację strat surowców, poprawę rentowności gospodarstw rolnych oraz zwiększenie odporności sektora rolnego na kryzysy. Przykłady działań podejmowanych w różnych częściach świata pokazują, jak ważne jest zamykanie cyklu produkcji, przekształcanie odpadów w wartościowe produkty oraz redukcja negatywnego wpływu rolnictwa na środowisko.

4.1 Stany Zjednoczone.

Według najnowszych danych opublikowanych przez Departament Rolnictwa

Stanów Zjednoczonych (USDA), w 2024 roku liczba gospodarstw rolnych w USA wyniosła 1 880 000, co oznacza spadek o 14 950 w porównaniu z rokiem 2023. Całkowita powierzchnia gruntów rolnych zmniejszyła się o 2 100 000 akrów, osiągając 876 460 000 akrów. Średnia wielkość gospodarstwa wzrosła z 464 akrów w 2023 roku do 466 akrów w 2024 roku (USDA, 2025).

Pod względem wartości sprzedaży liczba gospodarstw zmniejszyła się we wszystkich kategoriach, z wyjątkiem tych, których roczne przychody wynoszą 1 000 000 USD lub więcej. W 2024 roku 48,1% gospodarstw osiągnęło sprzedaż poniżej 10 000 USD, a 78,9% miało sprzedaż poniżej 100 000 USD. Jednocześnie 9,8% gospodarstw wygenerowało przychody na poziomie 500 000 USD lub więcej (USDA, 2025)..

Dane te potwierdzają postępującą konsolidację w amerykańskim rolnictwie – liczba gospodarstw maleje, ale ich średnia powierzchnia rośnie, podobnie jak znaczenie dużych gospodarstw o wysokich przychodach. Dzięki fuzjom z mniejszymi firmami amerykańskie korporacje rolnicze mogą inwestować w innowacyjne technologie, które pozwalają na zamykanie cyklu produkcji i minimalizację strat. Szczegółową analizę przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Przykłady amerykańskich firm z sektora rolniczego wdrażających zasady gospodarki o obiegu zamkniętym.

Firma	Działania zgodne z GOZ	Źródło
Tyson Foods	- Redukcja odpadów poprzez przetwarzanie produktów ubocznych na pasze, biopaliwa i inne materiały. - Zrównoważona produkcja pasz. - Odpady spożywcze przekazywane do organizacji non-profit.	"Sustainability" 2023
Cargill	- Wykorzystanie odpadów organicznych w produkcji białka, biopaliw i innych materiałów. - Zrównoważona produkcja pasz. - Inwestycje w biotechnologię.	"Sustainability Reports" 2023
Hormel Foods	- Recykling odpadów organicznych na pasze i nawozy. - Zrównoważona produkcja i zarządzanie zasobami. - Zmniejszenie emisji CO2 poprzez energooszczędne technologie.	"Global Impact Raport" 2023
JBS USA	- Przetwarzanie produktów ubocznych na pasze, nawozy, biopaliwa. - Zrównoważona produkcja mięsa, zmniejszenie zużycia wody i energii.	"Sustainability Report" 2023

	- Ochrona bioróżnorodności i redukcja wylesiania.	
<i>Smithfield Foods</i>	- Zrównoważona produkcja, zmniejszenie wpływu na środowisko. - Recykling odpadów organicznych na pasze i nawozy. - Zmniejszenie marnotrawstwa żywności poprzez zaawansowane systemy zarządzania odpadami.	"Sustainability Impact Report" 2023
<i>Perdue Farms</i>	- Redukcja odpadów, recykling produktów ubocznych na pasze i biopaliwa. - Zrównoważona produkcja drobiu, zmniejszenie zużycia wody i energii. - Innowacyjne technologie zmniejszające odpady.	"Company Stewardship Report" 2023
Dodatkowo firma posiada GreenCircle Zero Waste-To-Landfill		

Źródło: Opracowanie własne

W Stanach Zjednoczonych sektor rolniczy koncentruje się na wdrażaniu zrównoważonych technologii, takich jak przetwarzanie odpadów organicznych na biopaliwa, pasze i nawozy, a także na zmniejszaniu zużycia wody i energii. Firmy rolnicze inwestują w innowacje technologiczne i biotechnologię, aby zamykać cykl produkcji i minimalizować wpływ na środowisko.

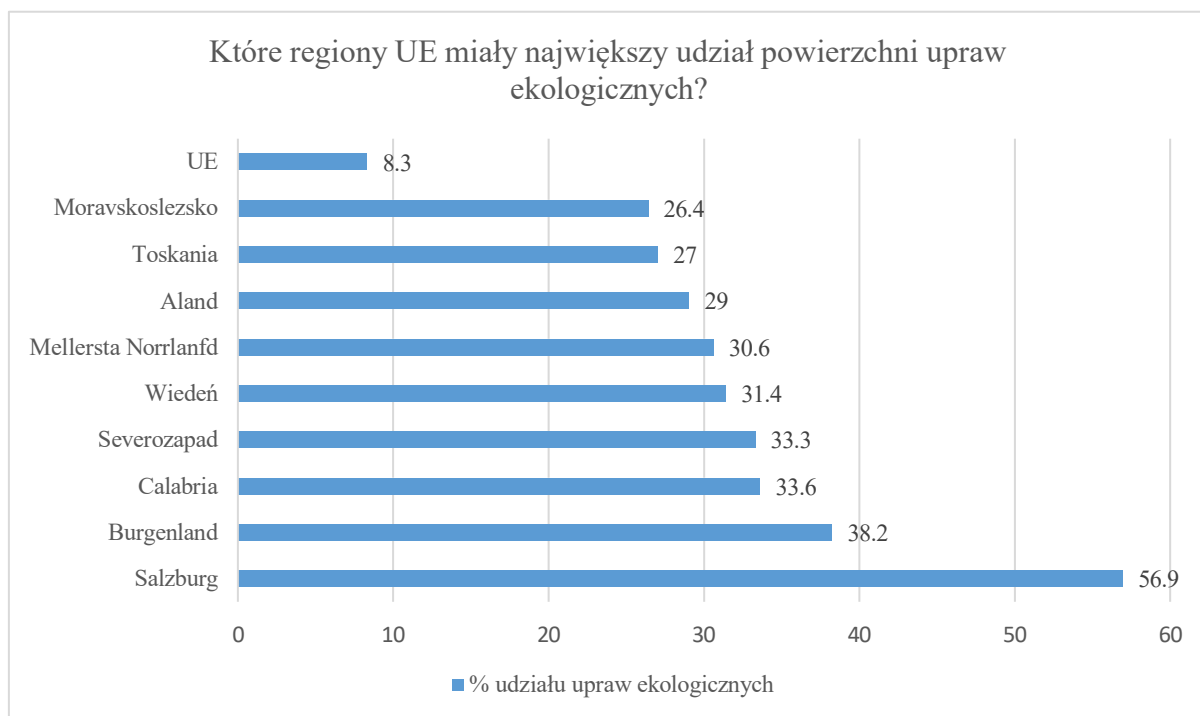
4.2 Unia Europejska.

Gospodarstwa rolne w Unii Europejskiej charakteryzują się dużą różnorodnością zarówno pod względem liczby, jak i średniej powierzchni. W krajach Europy Zachodniej dominują duże, wysoko zmechanizowane gospodarstwa, podczas gdy w regionach Europy Środkowo-Wschodniej nadal przeważają mniejsze, rodzinne gospodarstwa. W ostatnich latach obserwuje się jednak trend spadku liczby gospodarstw, przy jednoczesnym wzroście ich średniej powierzchni.

Rolnictwo w Unii Europejskiej ma również istotne znaczenie kulturowe, gdyż produkty rolne i tradycje kulinarne stanowią ważny element

tożsamości regionalnej. Różnorodność krajobrazów, klimatów oraz stosowanych technik rolniczych przyczynia się do szerokiej gamy produktów rolnych, które charakteryzują poszczególne regiony. W 2020 roku w UE było około 9,1 mln gospodarstw rolnych, które użytkowały 1,55 mln km² ziemi, co stanowiło 37,8% całkowitej powierzchni gruntów w Unii.

W ostatnich latach rolnictwo w UE przeszło transformację w kierunku bardziej zrównoważonych praktyk. Wzrost zainteresowania zdrowiem i ekologicznymi produktami doprowadził do szybkiego rozwoju rolnictwa ekologicznego. W 2020 roku około 8,3% powierzchni użytków rolnych w UE było przeznaczone na cele rolnictwa ekologicznego, a region Salzburg w Austrii wyróżniał się najwyższym wskaźnikiem, osiągając 56,9% powierzchni przeznaczonej na rolnictwo ekologiczne (Eurostat, 2024).



Rysunek 3. Kraje UE z największym odsetkiem powierzchni przeznaczonej na rolnictwo ekologiczne.

Źródło: Eurostat (2024).

Struktura gospodarstw w Unii Europejskiej zmienia się w odpowiedzi na zmieniające się potrzeby rynku i rosnącą świadomość ekologiczną konsumentów. Część gospodarstw, zwłaszcza w regionach takich jak wschodnia Rumunia, pozostaje kluczowym elementem rynku pracy, gdzie zatrudnienie w

rolnictwie, leśnictwie i rybołówstwie wciąż stanowi dużą część siły roboczej. W 2021 roku w regionie Vaslui w Rumunii ponad 59% siły roboczej było zatrudnionych w tych sektorach, co stanowiło wyjątek w UE.

Tabela 3. Charakterystyka wybranych państw członkowskich.

Kraj	Liczba gospodarstw	Średnia powierzchnia gospodarstwa	Użytki rolne (w mln ha)	Udział w całkowitej powierzchni użytków rolnych UE
Niemcy	263 500	63,0 ha	16,6	9,7%
Polska	1 317 700	11,1 ha	14,6	8,5%
Rumunia	2 887 700	4,1 ha	12,0	7,0%
Francja	416 000	69,0 ha	27,4	16,0%
Hiszpania	914 000	25,0 ha	23,9	14,0%

Źródło: Eurostat, 2020

Dane te wskazują na znaczące różnice w strukturze gospodarstw rolnych między krajami UE. Podczas gdy Francja i Niemcy charakteryzują się mniejszą liczbą, ale większymi powierzchniami gospodarstwami, Rumunia i Polska mają większą liczbę gospodarstw o mniejszej średniej powierzchni. Hiszpania plasuje się pośrednio, z umiarkowaną liczbą gospodarstw i średnią powierzchnią.

Należy zauważyć, że dane z 2020 roku są najnowszymi dostępnymi informacjami na poziomie całej Unii Europejskiej, opublikowanymi przez Eurostat. Aktualizacje tych danych są publikowane w cyklach kilkuletnich, dlatego informacje za rok 2023 mogą jeszcze nie być dostępne.

Wspólna Polityka Rolna (WPR) Unii Europejskiej odgrywa kluczową rolę w promowaniu

zrównoważonego rolnictwa, wspierając praktyki gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Celem GOZ jest minimalizacja odpadów i efektywne wykorzystanie zasobów, co obejmuje m.in. ograniczenie stosowania pestycydów oraz lepsze zarządzanie glebą. Wdrożenie tych praktyk nie tylko przyczynia się do ochrony środowiska, ale również

wpływa na strategiczną konkurencyjność firm rolniczych w Europie, zwłaszcza w kontekście rygorystycznej polityki ekologicznej UE.

W tabeli 4 przedstawiono przykłady firm rolniczych z krajów UE, które wdrożyły zasady gospodarki o obiegu zamkniętym.

Tabela 4. Firmy rolnicze w UE wdrażające gospodarkę o obiegu zamkniętym (GOZ).

Firma	Działania zgodne z GOZ	Źródło
<i>Valaha Farm (Węgry)</i>	Kompostowanie, stare odmiany drzew owocowych, przetwórstwo lokalne	www.valahatanya.hu
<i>Adro (Belgia)</i>	Przetwarza odpady pozostałe z produkcji warzyw i owoców na biogaz, nawozy organiczne oraz wodę pitną poprzez projekt MIMOSA, tworząc zamknięty obieg zasobów	Ardo CSR 2024
<i>Sol și Suflét (Rumunia)</i>	Holistyczny wypas, biointensywne warzywnictwo, retencja wody	https://c4r.info/en/news/mapping-soil-and-soul-and-green-mogo
<i>AUGA Group (Litwa)</i>	Stosuje model rolnictwa zamkniętego: uprawy, hodowla bydła i produkcja grzybów wzajemnie się uzupełniają – odpad z jednej produkcji to surowiec dla innej	AUGA group Consolidated Annual Report Sustainability Report 2023
<i>La Junquera (Hiszpania)</i>	Regeneratywne rolnictwo: agroforestry, kompostowanie, lokalne systemy żywnościowe, edukacja rolnicza.	www.lajunquera.com

Źródło: Opracowanie własne

Sektor rolniczy w Europie koncentruje się na wdrażaniu zasad gospodarki o obiegu zamkniętym poprzez ograniczanie odpadów, przetwarzanie biomasy na kompost i biogaz, promowanie lokalnego przetwórstwa oraz regeneratywnych metod upraw, takich jak agroleśnictwo, retencja wody i biointensywne warzywnictwo. Gospodarstwa coraz częściej łączą produkcję roślinną i zwierzęcą w spójne systemy, gdzie odpady z jednego etapu stają się surowcem dla kolejnego, co sprzyja ochronie środowiska i wzmacnia lokalne systemy żywnościowe.

4.3 Polska.

Polska prowadzi szczegółową ewidencję rolnictwa ekologicznego pod kątem liczby gospodarstw i powierzchni użytków rolnych, a dane te regularnie publikowane są przez Główny Inspektorat Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych (GIJHARS) oraz Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi (MRiRW).

Tabela 5. Liczba producentów ekologicznych w Polsce wg stanu na dzień:

Województwo	31.12.2024	31.12.2023	31.12.2022	31.12.2021	31.12.2020
<i>dolnośląskie</i>	885	853	849	804	761
<i>kujawsko-pomorskie</i>	445	443	496	489	451
<i>lubelskie</i>	2052	2062	2063	2 084	2054
<i>lubuskie</i>	1293	1206	1166	1 111	958
<i>łódzkie</i>	674	653	637	642	622
<i>małopolskie</i>	718	739	771	821	810
<i>mazowieckie</i>	2995	3015	2873	2812	2661
<i>opolskie</i>	92	92	90	87	76

<i>podkarpackie</i>	839	882	943	1 005	1033
<i>podlaskie</i>	5014	4636	4093	3 426	2953
<i>pomorskie</i>	796	693	663	655	607
<i>śląskie</i>	242	239	227	225	203
<i>świętokrzyskie</i>	562	589	612	641	635
<i>warmińsko-mazurskie</i>	3924	3834	3690	3 501	3270
<i>wielkopolskie</i>	1263	1118	1075	1 017	971
<i>zachodniopomorskie</i>	2999	2941	2634	2 475	2209
Razem	24 793	23 995	22 882	21 795	20274

Źródło: Inspekcja Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych, dane o rolnictwie ekologicznym.

Tabela 6. Powierzchnia ekologicznych użytków rolnych (w ha) w Polsce wg stanu na dzień:

Województwo	31.12.2024	31.12.2023	31.12.2022	31.12.2021	31.12.2020
<i>dolnośląskie</i>	39921,88	36039,26	32678,62	30 652,72	30480,83
<i>kujawsko-pomorskie</i>	11935,25	9235,93	9034,00	8 819,74	7092,59
<i>lubelskie</i>	31723,56	30351,64	28114,55	28017,57	28357,18
<i>lubuskie</i>	64972,88	56693,74	51679,67	50 448,54	43126,16
<i>łódzkie</i>	11704,76	11248,98	11010,27	10 317,18	9953,45
<i>małopolskie</i>	8004,86	8226,66	7506,34	7 924,32	8360,02
<i>mazowieckie</i>	54317,39	52589,02	41021,47	47 450,72	41217,95
<i>opolskie</i>	2572,40	2691,26	2623,46	2 668,23	3323,59
<i>podkarpackie</i>	10109,41	11125,00	12076,33	13 309,05	12725,91
<i>podlaskie</i>	99031,71	87591,99	66679,61	60 740,74	52414,55
<i>pomorskie</i>	29732,50	24861,89	22389,91	23 110,11	20792,27
<i>śląskie</i>	3975,71	3903,54	3919,76	3 701,79	3460,48
<i>świętokrzyskie</i>	8241,38	8405,73	8775,53	8 570,14	8340,40
<i>warmińsko-mazurskie</i>	136049,39	130429,14	105240,09	114 399,04	108808,47
<i>wielkopolskie</i>	41068,81	36430,67	34069,74	29 945,24	29330,38
<i>zachodniopomorskie</i>	138109,25	126196,96	117812,36	109 367,80	101507,02
Razem	691471,1	636021,41	554631,70	549 442,93	509291,27

Źródło: Inspekcja Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych, dane o rolnictwie ekologicznym.

Po przystąpieniu do Unii Europejskiej w latach 2004–2013 liczba gospodarstw stosujących ekologiczne metody produkcji oraz powierzchnia ekologicznych użytków rolnych wzrosły ponad siedmiokrotnie. Od 2014 roku jednak obserwowano spadek zarówno liczby takich gospodarstw, jak i powierzchni upraw ekologicznych. W 2023 roku liczba gospodarstw ekologicznych, obejmujących zarówno te w trakcie konwersji, jak i posiadające certyfikat, wyniosła 22,4 tysiąca, co stanowi wzrost o 5,5% w stosunku do roku poprzedniego, lecz jest jednocześnie o 16% niższa niż rekordowa liczba z 2013 roku (26,6 tys.). Powierzchnia ekologicznych użytków rolnych w 2023 roku wyniosła 636,0 tys. ha, czyli o 14,7% więcej niż w 2022 roku, jednak nadal była o 5,1% mniejsza niż w 2013 roku. Zwiększenie liczby gospodarstw ekologicznych szło w parze ze wzrostem średniej powierzchni ekologicznych użytków rolnych na jedno gospodarstwo – z 26,2 ha w 2022 roku do 28,5 ha w 2023 roku. Ponad połowa, około 60%, gospodarstw ekologicznych koncentruje się w czterech województwach: podlaskim (20,5%), warmińsko-mazurskim (17,0%), zachodniopomorskim (13,0%) oraz mazowieckim (11,4%) (GUS, 2024).

Dane te świadczą o tym, że rolnictwo ekologiczne w Polsce, mimo pewnych wahań, rozwija się w sposób zrównoważony i zgodny z zasadami GOZ, przyczyniając się do ochrony środowiska oraz podniesienia jakości produkcji rolnej. Polska, jako członek Unii Europejskiej, realizuje polityki unijne związane z gospodarką o obiegu zamkniętym, m.in. w ramach strategii „From Farm to Fork”. W dostępnych raportach Głównego Urzędu Statystycznego i GIJHARS znajdują się dane dotyczące rolnictwa ekologicznego, które stanowi jeden z filarów GOZ. Niemniej jednak szczegółowe statystyki dotyczące wdrażania zasad GOZ w rolnictwie są na razie niepełne i nie oddają kompleksowego obrazu całego sektora. W ostatnich latach, zwłaszcza w 2022 i 2023 roku, wzrosło zainteresowanie certyfikatami ekologicznymi oraz programami dofinansowań wspierających działania prośrodowiskowe, takie jak agroleśnictwo czy stosowanie naturalnych nawozów. Programy operacyjne, w tym PROW na lata 2014–2020 oraz nowy PROW na lata 2023–2027, promują działania zgodne z GOZ, oferując wsparcie dla gospodarstw ekologicznych, systemów rolno-środowiskowo-klimatycznych oraz gospodarowania odpadami organicznymi.

Obecnie gospodarka o obiegu zamkniętym w polskim rolnictwie jest na etapie rozwoju i stopniowego wdrażania. Coraz więcej gospodarstw decyduje się na ekologiczne metody produkcji, które stanowią podstawę funkcjonowania GOZ. Mimo rosnącej świadomości rolników, konsumentów i decydentów co do potrzeby przejścia na zrównoważone praktyki, wciąż brakuje szczegółowych danych statystycznych obrazujących

pełen zakres wdrożenia GOZ w sektorze rolnym. Obserwowany trend wskazuje jednak na systematyczne zwiększanie udziału działań sprzyjających ochronie środowiska i racjonalnemu wykorzystaniu zasobów naturalnych.

W tabeli 7 przedstawiono przykłady firm rolniczych z Polski, które wdrożyły zasady gospodarki o obiegu zamkniętym.

Tabela 7. Polskie firmy rolnicze wdrażające gospodarkę o obiegu zamkniętym (GOZ).

Firma	Działalność	Zasada gospodarki o obiegu zamkniętym	Źródło
<i>Gospodarstwo Łukasza Czech</i>	Hodowla świń, uprawa zbóż; wykorzystanie nawożenia organicznego	Wykorzystanie gnojowicy i digestatu z biogazowni jako nawozu; precyzyjne nawożenie	EU CAP Network
<i>Farmutil HS (Śmiłowo)</i>	Produkcja pelletów z trawy z łąk	Przeróbka biomasy na biopaliwo; technologia zero-odpadowa	Kowalski & Makara, 2021
<i>Kipster</i>	Ekologiczna farma kur działająca w oparciu o zamknięte cykle; neutralność emisyjna	Zarządzanie odpadami, recykling, minimalizacja śladu węglowego	kipster.farm
<i>GRO Together / Ecobean</i>	Przetwarzanie odpadów spożywczych (np. fusy kawowe) na grzyby i inne bioprodukty	Wykorzystanie bioodpadów do tworzenia nowych produktów	Agroberichten Buitenland
<i>Winnice z Dolnego Śląska</i>	Produkcja oleju z nasion winogron oraz innych produktów z odpadów z winifikacji	Wykorzystanie odpadów rolnych (wytlóków winogronowych) w produkcji wartościowej	psr.tuchow.pl

Źródło: Opracowanie własne

Polskie rolnictwo coraz częściej wdraża zasady gospodarki o obiegu zamkniętym, choć działania te mają głównie charakter lokalny i inicjowane są oddolnie. Najczęściej spotykane praktyki to wykorzystywanie gnojowicy i odpadów organicznych jako nawozów, produkcja biopaliw z biomasy, recykling bioodpadów oraz zamykanie obiegów w hodowli zwierząt. Przykłady takie jak farmy świń wykorzystujące digestat z biogazowni, przetwórstwo fusów kawowych czy oleje z odpadów winogronowych pokazują, że polskie gospodarstwa potrafią łączyć rolnictwo z nowoczesnymi technologiami i ekologicznym podejściem. Wyzwaniem pozostaje jednak upowszechnienie tych rozwiązań w skali krajowej, zwłaszcza wśród mniejszych gospodarstw.

5. Podsumowanie i wnioski.

W rolnictwie, podobnie jak w innych sektorach, konkurencyjność stanowi kluczowy

element rozwoju. Wdrażanie rozwiązań z zakresu gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) umożliwia poprawę efektywności, redukcję strat surowców i wzrost odporności sektora na kryzysy. GOZ opiera się m.in. na przekształcaniu odpadów w produkty wartościowe i minimalizacji wpływu rolnictwa na środowisko.

W Stanach Zjednoczonych, mimo spadku liczby gospodarstw do 1,88 mln w 2024 r., rośnie ich średnia powierzchnia i znaczenie dużych producentów. Firmy takie jak Tyson Foods, Cargill, Hormel czy JBS USA wdrażają GOZ poprzez recykling odpadów organicznych, produkcję biopaliw i pasz, zmniejszenie zużycia zasobów oraz rozwój biotechnologii.

W Unii Europejskiej struktura gospodarstw jest zróżnicowana – od dużych gospodarstw w Europie Zachodniej po małe rodzinne gospodarstwa w Europie Środkowo-Wschodniej. W 2020 roku

istniało ok. 9,1 mln gospodarstw, a 8,3% użytków rolnych miało charakter ekologiczny. Kraje takie jak Austria czy Hiszpania promują praktyki regeneratywne i lokalne systemy żywnościowe. Przykłady wdrażania GOZ obejmują m.in. Valaha Farm na Węgrzech (kompostowanie, lokalne odmiany), Ardo w Belgii (produkcja biogazu z odpadów) oraz AUGA Group na Litwie (zamknięty model produkcji).

W Polsce, według GJIHARS, liczba producentów ekologicznych w 2024 r. wyniosła 24 793, a powierzchnia ekologicznych użytków rolnych przekroczyła 691 tys. ha. Wiodące województwa to podlaskie i zachodniopomorskie. Po dynamicznym wzroście po 2004 roku, po 2014 roku nastąpiła stagnacja, jednak ostatnie lata wskazują na ponowny wzrost zainteresowania rolnictwem ekologicznym.

Wdrażanie GOZ w rolnictwie, zarówno w USA, UE, jak i w Polsce, pozwala nie tylko ograniczać odpady i wykorzystywać je ponownie, ale też zwiększa efektywność i konkurencyjność gospodarstw, wpisując się w globalne dążenia do zrównoważonego rozwoju.

Wdrażanie gospodarki o obiegu zamkniętym w rolnictwie znacząco zwiększa konkurencyjność gospodarstw, ponieważ pozwala na ograniczenie kosztów produkcji poprzez efektywniejsze wykorzystanie zasobów oraz redukcję odpadów. Dzięki temu gospodarstwa stają się bardziej odporne na kryzysy ekonomiczne i klimatyczne, co zwiększa ich stabilność i niezależność od zewnętrznych czynników. Wprowadzanie rozwiązań GOZ sprzyja również innowacyjności i rozwojowi nowych technologii, co stanowi dodatkową przewagę na wymagających rynkach, szczególnie tych, które kładą nacisk na zrównoważony rozwój i ochronę środowiska. Różnorodność form i skali wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym w różnych krajach pokazuje, że skuteczność tych rozwiązań jest uwarunkowana lokalnymi czynnikami, takimi jak struktura gospodarstw, polityka rolna czy poziom wsparcia instytucjonalnego. Polska, mimo pewnej stagnacji w ostatnich latach, dysponuje dużym potencjałem do rozwoju GOZ w rolnictwie, zwłaszcza dzięki rosnącemu sektorowi gospodarstw ekologicznych oraz możliwościom pozyskania funduszy unijnych. W konsekwencji, rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym powinien być postrzegany nie tylko jako wymóg ochrony środowiska, lecz jako strategiczna inwestycja w długoterminową efektywność, rentowność i konkurencyjność gospodarstw rolnych, odpowiadająca na zmieniające

się potrzeby konsumentów i wyzwania globalnego rynku.

Literatura:

- [1]. Adaptacja rolnictwa do zmian klimatycznych w Polsce. (2019). Raport przygotowany przez Dolnośląski Ośrodek Doradztwa Rolniczego. <https://www.dodr.pl/sites/default/files/userfiles/contents/publikacje/106/zmiany klimatu2019.pdf>
- [2]. Agroberichten Buitenland. (2022, 16 listopada). Poland going circular: use of biowaste. Pobrano 14 lipca 2025 z Agroberichten Buitenland.
- [3]. Ardo. (2024). Corporate Social Responsibility Report 2024. Ardo.
- [4]. AUGA Group. (2023). Sustainability Report 2023. AUGA Group.
- [5]. Cargill (2023) "Sustainability Reports" [online]. Dostępne na: <https://www.cargill.com/sustainability>
- [6]. Chryk, M. (2014). Winnice na Pogórzu Karpackim. Tuchów: Pogórzańskie Stowarzyszenie Rozwoju. Pobrano 14 lipca 2025 z http://www.psr.tuchow.pl/wp-content/uploads/2014/01/Winnice_na_Pogorzu_Karpackim.pdf
- [7]. C4R. (n.d.). Mapping Soil and Soul and Green Mogo. Pobrane z <https://c4r.info/en/news/mapping-soil-and-soul-and-green-mogo>
- [8]. Constantin, M., Deaconu, M. E., Petrescu, I. E., Istudor, M., & Tărășilă, G. A. (2022). A review on the competitiveness and performance of ecological, organic and regenerative agricultural systems. In Proc. Int. Conf. Bus. Excell (Vol. 16, pp. 304-316).
- [9]. EU CAP Network Good Practice report (2023), Precision agriculture investment promotes circular economy approaches on Polish pig farms. Pobrano 14 lipca 2025, z https://eu-cap-network.ec.europa.eu/good-practice/precision-agriculture-investment-promotes-circular-economy-approaches-polish-pig_de?utm
- [10]. European Commission, 2020. A Farm to Fork Strategy for a Fair, Healthy and Environmentally-Friendly Food System. COM(2020) 381 final.
- [11]. European Environment Agency (2020), Global climate change impacts and the supply of agricultural commodities to Europe, EEA Report Briefing 27/2020, Luxembourg, ISBN: 978-92-9480-319-1
- [12]. Eurostat (2024) Agriculture statistics at regional level. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics->

- explained/index.php?title=Agriculture_statistics_at_regional_level
- [13]. García-Granero, E. M., Piedra-Muñoz, L., Galdeano-Gómez, E., & Sorroche-del-Rey, Y. (2025). A path towards sustainability through the circular economy phenom: indicators from the Spanish agri-food sector. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 16(7), 28-61.
- [14]. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2024, Rolnictwo w 2023 roku, e-ISSN 2956-378X, rozdział 2.5 „Gospodarstwa ekologiczne”.
- [15]. Grochowska, R., & Staszczak, A. (2021). Możliwości implementacji założeń unijnej strategii „Od pola do stołu” w sektorze rolno-spożywczym. *Przemysł Spożywczy*, 75.
- [16]. Hamam, M., Chinnici, G., Di Vita, G., Pappalardo, G., Pecorino, B., Maesano, G., & D’Amico, M. (2021). Circular economy models in agro-food systems: A review. *Sustainability*, 13(6), 3453.
- [17]. Hamam, M., Spina, D., Raimondo, M., Di Vita, G., Zanchini, R., Chinnici, G., ... & D’Amico, M. (2023). Industrial symbiosis and agri-food system: Themes, links, and relationships. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1012436.
- [18]. Hormel Foods (2023) "Global Impact Report" [online]. Dostępne na: <https://www.hormelfoods.com/wp-content/uploads/Hormel-Foods-2023-Global-Impact-Report.pdf>
- [19]. Jaworski, T., & Grochowska, S. (2017). Gospodarka Obiegu Zamkniętego–kryteria osiągnięcia i perspektywa wdrożenia w Polsce. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 19(4).
- [20]. JBS USA (2023) "Sustainability Report 2023" [online]. Dostępne na: https://jbsesg.com/docs/JBS_Sustainability_Report_2023.pdf
- [21]. Juliana, J. P. E., & Nyoman, Y. N. (2019). Factors influencing competitiveness of small and medium industry of Bali: Porter’s five forces analysis. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 89(5), 45-54.
- [22]. Kipster. (n.d.). About. Pobrano 14 lipca 2025, z <https://kipster.farm/about-us/>
- [23]. Kłak, A., Zawisza, W., & Osińska, M. (2023). "Optymalizacja gospodarki odpadami w przedsiębiorstwach produkcyjnych: na przykładzie firmy Gumres." *Zarządzanie i Inżynieria Produkcji*, 7(2), 101-112. <https://ojs.ahe.lodz.pl/index.php/ziwgib/article/view/419>
- [24]. Kolpiński, K., Kowalski, M., & Nowak, J. (2022). "Zrównoważony rozwój w polskim rolnictwie: analiza wyzwań i działań adaptacyjnych w kontekście zmian klimatycznych." *Prace Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*, 9(3), 124-135. <https://prs.sggw.edu.pl/article/view/4512>
- [25]. Kowalski, Z., & Makara, A. (2021). The circular economy model used in the polish agro-food consortium: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124751.
- [26]. Kulczycka, J., & Pędziwiatr, E. (2019). Gospodarka o obiegu zamkniętym–definicje i ich interpretacje. *Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych*, 9-20.
- [27]. La Junquera– Regenerative Farming. Pobrane z <https://www.lajunquera.com>
- [28]. Osińska, M. (2024). "Efektywność wykorzystania zasobów naturalnych w krajach UE i ich wpływ na wytwarzanie odpadów komunalnych." *Wskaźniki zrównoważonego rozwoju UE*, 15(4), 19-36. <https://ws.stat.gov.pl/Article/2024/1/019-036>
- [29]. Perdue Farms (2023) "Company Stewardship Report" [online]. Dostępne na: <https://player.flipsnack.com/?hash=RkQ2RTlEOUM1QTgrZHgzMmptcGQxag==>
- [30]. Porter, Michael E. Porter (2000) *The Competitive Advantage of Nations*. Free Press.
- [31]. Rodino, S., Pop, R., Sterie, C., Giuca, A., & Dumitru, E. (2023). Developing an evaluation framework for circular agriculture: a pathway to sustainable farming. *Agriculture*, 13(11), 2047.
- [32]. Smithfield Foods (2023) "Sustainability Impact Report" [online]. Dostępne na: http://www.smithfieldfoods.com/2023sustainabilityreport?_gl=1*1qpi8pg*_gcl_au*MjYyMTc0MTA5LjE3NDM1ODAxNTc
- [33]. Soliwoda, M. Wieliczko, B. & Kulawik, J. (2020). Gospodarka w cyklu zamkniętym a zrównoważenie agrobiznesu. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej/Problems of Agriculture Economics*, 362(1), 3-13.
- [34]. Tyson Foods (2023) "Sustainability" [online]. Dostępne na: <https://www.tysonfoods.com/sustainability>
- [35]. United States Department of Agriculture (2025) *Farms and Land in Farms 2024 Summary*, February 2025, ISSN: 1995-2004.
- [36]. United States Department of Agriculture (2020), *Optimizing agricultural management to mitigate climate change impacts*
- [37]. Valaha Farm. (n.d.). Home. Pobrane z <https://www.valahatanya.hu>

Streszczenie

Gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ) odgrywa istotną rolę w zwiększaniu strategicznej konkurencyjności gospodarstw rolnych, pozwalając na efektywniejsze wykorzystanie zasobów oraz redukcję odpadów. Wdrażanie zasad GOZ sprzyja poprawie efektywności produkcji, zmniejsza koszty oraz zwiększa odporność gospodarstw na kryzysy ekonomiczne i klimatyczne. Różnorodne praktyki, takie jak recykling odpadów organicznych, produkcja biopaliw czy rozwój biotechnologii, przyczyniają się do zrównoważonego rozwoju sektora rolnego zarówno w Polsce, Unii Europejskiej, jak i Stanach Zjednoczonych. W Polsce obserwuje się rosnące zainteresowanie rolnictwem ekologicznym, co stanowi ważny element wdrażania GOZ. Wdrożenia te nie tylko przyczyniają się do ochrony środowiska, lecz także stanowią strategiczną inwestycję w długoterminową efektywność i rentowność gospodarstw rolnych. Kluczowe jest dostosowanie rozwiązań GOZ do lokalnych uwarunkowań, takich jak struktura gospodarstw i polityka rolna, aby w pełni wykorzystać ich potencjał. W obliczu rosnących wymagań rynku oraz wyzwań klimatycznych, gospodarka o obiegu zamkniętym staje się fundamentem nowoczesnego, konkurencyjnego i zrównoważonego rolnictwa.

Słowa kluczowe: gospodarka o obiegu zamkniętym, konkurencyjność gospodarstw rolnych, rolnictwo ekologiczne, zrównoważony rozwój, efektywność produkcji, recykling odpadów, innowacje w rolnictwie, odporność na kryzysy, biopaliwa, biotechnologia.

Abstrakt

The circular economy plays an important role in increasing the strategic competitiveness of farms, allowing for more efficient use of resources and reduction of waste. The implementation of circular economy principles improves production efficiency, reduces costs, and increases the resilience of farms to economic and climate crises. Various practices, such as organic waste recycling, biofuel production, and biotechnology development, contribute to the sustainable development of the agricultural sector in Poland, the European Union, and the United States. In Poland, there is growing interest in organic farming, which is an important element of circular economy implementation. These implementations not only contribute to environmental protection but also represent a strategic investment in the long-term efficiency and profitability of farms. It is crucial to adapt circular economy solutions to local conditions, such as farm structure and agricultural policy, in order to fully exploit their potential. In the face of growing market demands and climate challenges, the circular economy is becoming the foundation of modern, competitive, and sustainable agriculture.

Keywords: circular economy, competitiveness of farms, organic farming, sustainable development, production efficiency, waste recycling, innovation in agriculture, crisis resilience, biofuels, biotechnology.

Spis Treści

mgr inż. Jakub Łygan, dr hab. inż. Anna Czaplicka, prof. PK

WYKORZYSTANIE WYBRANYCH BIOTESTÓW DO KONTROLI JAKOŚCI ŚRODOWISKA WODNEGO.....2

D.Sc. Kateryna Babii, Eng. Oleksandr Ikol, Eng. Daria Riumina, Eng. Yevhenii Maleiev, Joanna Kulczycka

CURRENT ISSUES WITH THE EXPLOITATION OF FLUORITE DEPOSITS IN UKRAINE.....11

mgr inż. arch. Justyna M. Kobylarczyk

GOSPODARKA O OBIEGU ZAMKNIĘTYM JAKO KLUCZOWY CZYNNIK STRATEGICZNEJ KONKURENCYJNOŚCI GOSPODARSTW ROLNYCH.....20

WYDAWCA: KRAKOWSKIE TOWARZYSTWO TECHNICZNE

30-563 Kraków, ul. Malborska 10/6

Redaguje: **KOMITET**

Redaktor Naczelny: dr **OLGA JANIKOWSKA**, IGSMiE PAN, Kraków, e-mail: olgajan@min-pan.krakow.pl

Z-ca Redaktora Naczelnego: prof. dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**

Sekretarz: mgr inż. **NATALIA GENEROWICZ- CABA**, IGSMiE PAN, Kraków

Redaktor zeszytu nr 204:

prof. dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**

Kolegium Redakcyjne:

dr inż. **JERZY BANAŚ**

mgr inż. **MIECZYŚLAW MAJCHER**

dr inż. **WIESŁAWA STYKA**

Redakcja Naukowa:

prof. dr hab. inż. **AGNIESZKA GENEROWICZ**

dr hab. inż. **NATALIA IWASZCZUK**, prof. AGH

prof. dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**

prof. **GENNADIY PIVNYAK**

prof. **ROMAN EMILIAN DYCHKOVSKI**

prof. **NATALIIA IVANIVNA SHTEMENKO**

prof. dr hab. inż. **RYSZARD TADEUSIEWICZ**

Redaktor techniczny - skład i łamanie tekstu: mgr **MACIEJ MAŃKA**

Redakcja nie zwraca nadesłanych materiałów.

W publikowanych artykułach redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania skrótów.

Redakcja nie odpowiada za treść ogłoszeń.

© Copyright by Krakowskie Towarzystwo Techniczne 2025

ISSN 1425-8390

NR INDEKSU 334006

2nd PRO-SLO PhD School – CALL FOR STUDENTS IS OPEN!

After a very successful 1st edition in 2025, the **Call for student applications** for the 2nd **PRO-SLO PhD School**, that is funded by EIT RawMaterials, is open!

From the 4th of November to the 15th of December 2025, students can apply for participation through the link: [2nd PRO-SLO PhD School Student Application](#)

The School is a specialized education programme in the topic of Social Licence to Operate (SLO), comprising **online and onsite** parts, **exclusively for PhD students** in the field of raw materials, engineering, social, business, economic and environmental sciences.

The 2026 School edition comprises an online part, from **9th to 13th of February 2026**, with lectures on the basic SLO principles and terminology from various perspectives, such as policy, societal, ethical and environmental and SLO examples related to the Raw Materials sector. During the onsite part, from **the 19th to the 24th of April 2026**, to be held in **Kassandra Mines of Hellas Gold S.A in Greece**, students will interact with stakeholders to develop a methodology to obtain SLO, with the support of academic and industry mentors. Between the two parts, in the interval period, from the **23rd of February to the 27th of March**, students will work in groups and will be assigned with an SLO-related project with frequent online mentorship meetings.

Link do strony oraz resjstracji:

<https://www.proslo.eu/for-students>

<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScVqEaszjItBGcD34CJGH4tWonp6NKPBanQ73adnDBpV8qDdg/colosedform>



Projekt RM SLO PLUS Hub

Celem projektu jest wzmacnianie SLO poprzez wiedzę i narzędzia wspierające przejrzystość, zaufanie i odpowiedzialne praktyki w sektorze RM. Projekt obejmuje utworzenie repozytorium najlepszych praktyk, programy szkoleniowe dla różnych interesariuszy w całym cyklu życia surowców oraz usługi doradcze wspierające dialog i zgodność z regulacjami. Przewidziano też pilotażowy kurs dla 150 osób, prezentujący innowacyjne metody nauczania, ze szczególnym naciskiem na prawo UE, zasady ESG i studia przypadków. Hub integruje wiedzę akademii, przemysłu i organizacji.

Koordynatorem projektu jest Narodowy Uniwersytet Techniczny w Atenach, Wydział Górnicztwa i Inżynierii Metalurgicznej (NTUA, SMEE) – instytucja z bogatym doświadczeniem w zarządzaniu projektami edukacyjnymi i badawczymi. Oprócz uczelni pełniącą funkcję koordynatora, konsorcjum projektowe tworzą wyspecjalizowane instytucje, ośrodki naukowe i przedsiębiorstwa działające w obszarze surowców i SLO, edukacji i pedagogiki cyfrowej pochodzące z głównych europejskich regionów (Austria, Bośnia i Hercegowina, Finlandia, Grecja, Polska, Hiszpania).

Projekt realizowany jest w ramach EIT Raw Materials

Supported by



Link do strony:

<https://slohub.org/>