

Od obserwacji natury do technologii. Krótki przegląd metod sekwestracji CO₂ wykorzystujących skały ultramaficzne

Błażej Cieślik¹, Natasza Markiewicz¹

From observations of nature to technology. A brief overview of CO₂ sequestration methods using ultramafic rocks. Prz. Geol., 73: 994–1001; doi: 10.7306/2025.108

Abstract. Since the 19th century, it has been known that certain minerals can react with carbon dioxide (CO₂), as evidenced by the formation of listvenites, carbonate- and quartz-rich rocks resulting from the alteration of ultramafic rocks by CO₂-rich fluids. Ultramafic rocks are now recognized as candidates for secure, long-term carbon dioxide (CO₂) sequestration through mineral carbonation. This paper provides a brief overview of both natural and engineered CO₂ removal strategies, with emphasis on in situ and ex situ mineral carbonation, as well as enhanced weathering. These approaches are based on reactions between CO₂ and divalent cations released during the dissolution of silicate minerals, resulting in the formation of stable carbonate minerals. Experimental studies and pilot projects have confirmed the feasibility of these methods. We highlight the potential of ultramafic rocks from the Central Sudetic Ophiolites in southwestern Poland, particularly the Braszowice–Brzeźnica Massif, for efficient CO₂ mineralization. Carbonation experiments show that serpentinized peridotites from this area readily form magnesite during ex situ carbonation. Although challenges remain, such as low rock permeability, variability in mineral reactivity, and the potential mobilization of trace metals, mineral carbonation remains a promising strategy for mitigating anthropogenic CO₂ emissions.

Keywords: Mineral carbonation, ultramafic rocks, carbon dioxide, global warming

Od czasów pierwszej rewolucji przemysłowej, czyli od drugiej połowy XVIII w., stężenie CO₂ w ziemskiej atmosferze nieustannie rośnie. Główną przyczyną tego zjawiska jest spalanie paliw kopalnych, przede wszystkim na potrzeby produkcji energii cieplnej i elektrycznej, które są niezbędne do funkcjonowania ludzi i przemysłu (Wrigley, 2013). Znaczna część emisji, zwłaszcza w krajach wysoko rozwiniętych, jest wytwarzana przez transport, produkcję cementu czy przemysłową hodowlę zwierząt. W 1850 r. globalne średnie stężenie CO₂ w atmosferze wynosiło ok. 285 ppm, a w 2025 r. przekroczyło 427 ppm (dane udostępnione przez NOAA; marzec 2025 r.). W efekcie temperatura powierzchni Ziemi w latach 1850–2020 wzrosła o ok. 1,2°C (Chen, 2021). Według raportu Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (tzw. raport IPCC) z 2021 r. najbardziej realistyczny scenariusz przewiduje, że do końca XXI w. stężenie CO₂ w atmosferze osiągnie od 550 do 900 ppm, w zależności od skali emisji w nadchodzących dekadach (Canadell i in., 2023). Najbardziej optymistyczna prognoza, która została przedstawiona w raporcie, zakłada, że stężenie CO₂ w atmosferze ustabilizuje się na poziomie od ok. 420 do 500 ppm do końca XXI w. Jest to ścieżka zgodna z celami Porozumienia Paryskiego z 2015 r., które przewiduje ograniczenie globalnego ocieplenia do <2°C, a w optymalnym scenariuszu do <1,5°C w porównaniu z epoką przedprzemysłową. Całkowite odejście od spalania paliw kopalnych wciąż pozostaje odległą i niemal utopijną wizją. Rzeczywisty udział aktywności człowieka i związana z nią emisja gazów cieplarnianych oddziałujących na klimat stały się w ostatnich latach przedmiotem intensywnej i szeroko dyskutowanej debaty naukowej (np. Marks, 2025). Zdecydowana większość wyników współczesnych badań, co podkreślają Summerhayes i współautorzy (2025), wskazuje, że to jednak działalność człowieka stanowi dominujący czynnik

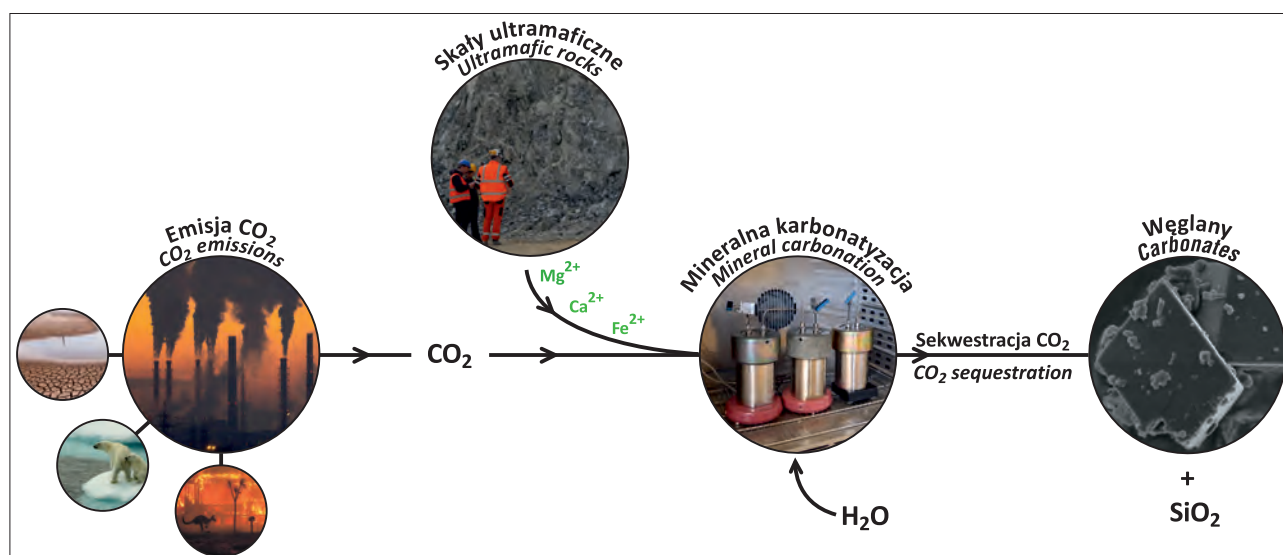
odpowiedzialny za współczesne zmiany klimatu. Dane geologiczne wskazują, że obecne stężenie CO₂ jest najwyższe od środkowego miocenu, czyli od ok. 16,0 mln lat. W ostatnich latach są intensywnie rozwijane różne technologie mające na celu ograniczenie emisji CO₂ (Fu i in., 2022). Samo ograniczanie emisji może niewystarczyć (Hirata i in., 2024). Aby zapobiec dalszemu wzrostowi temperatury powierzchni naszej planety i coraz częstszym ekstremalnym zjawiskom pogodowym, konieczne jest poszukiwanie metod usuwania CO₂ z atmosfery.

NATURALNE PROCESY WIAŻĄCE CO₂ W SKAŁACH ULTRAMAFICZNYCH

Ziemia dysponuje naturalnymi mechanizmami usuwania dwutlenku węgla z atmosfery, jednak ich skuteczność jest ograniczona, a tempo tych procesów w skali geologicznej pozostaje znacznie wolniejsze od emisji generowanych przez działalność człowieka. Nawet gdyby emisja CO₂ całkowicie ustała, powrót do stężenia tego gazu w atmosferze sprzed rewolucji przemysłowej zająłby setki tysięcy lat (Cao, Caldeira, 2010).

Litosfera pełni istotną rolę w globalnym obiegu węgla, ponieważ niektóre skały mogą zarówno uwalniać CO₂ w wyniku wietrzenia, jak i wiązać go w przebiegu różnych procesów geologicznych. Geolodzy od dawna zdawali sobie sprawę z istnienia pewnych typów skał, które ze względu na swój skład chemiczny i cechy teksturalne są naturalnie predysponowane do pochłaniania CO₂. Do tej grupy należą przede wszystkim skały maficzne, zawierające od 50 do 90% minerałów maficznych i ultramaficzne, zawierające ponad 90% minerałów maficznych (Le Bas, Streckisen, 1991). Skały te składają się głównie z krzemianów magnezu i wapnia, takich jak magnezowe oliwiny i pirok-

¹ Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, pl. Maksa Borna 9, 50–204 Wrocław; blazej.cieslik2@uwr.edu.pl; 334284@uwr.edu.pl; ORCID ID: B. Cieślik – 0000-0002-7509-5230, N. Markiewicz – 0009-0004-3655-3958

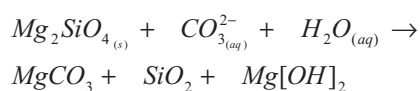


Ryc. 1. Uproszczony schemat trwałego wiązania CO₂ w procesie mineralnej karbonatyzacji. Minerale skał ultramaficznych podczas rozpuszczania oddają kationy (Mg²⁺, Ca²⁺, Fe²⁺), które następnie łączą się z anionem węglanowym obecnym w roztworze wodnym. Proces ten prowadzi do przekształcenia gazu CO₂ w węglany

Fig. 1. A simplified diagram illustrating the mechanism of permanent CO₂ sequestration through mineral carbonation. During dissolution, ultramafic rocks-forming minerals release cations (Mg²⁺, Ca²⁺, Fe²⁺), which react with carbonate anions in the aqueous solution. This process results in the transformation of gaseous CO₂ into a solid phase in the form of carbonates

seny, oraz tlenków, wśród których dominują, zawierające żelazo i chrom, magnetyt oraz chromit. Skały maficzne to przede wszystkim bazalty – w których oprócz wspomnianych minerałów występuje także wapieniowy plagioklaz – a także perydotyty i serpentynity (Schrenk i in., 2013). Dwuwartościowe kationy magnezu i wapnia mogą się uwalniać z oliwinów i piroksenów, na przykład poprzez ich rozpuszczenie w wodzie. Aby przyspieszyć ten proces, wodę często podgrzewa się do odpowiedniej temperatury lub dodaje katalizator (Bremen i in., 2021).

CO₂ jest związkiem elektronowo obojętnym, ale po rozpuszczeniu w wodzie tworzy kwas węglowy (H₂CO₃), który dysocjuje do jonów HCO₃⁻ i CO₃²⁻. Jon CO₃²⁻ może się łączyć z Mg²⁺ oraz Ca²⁺, co prowadzi do wytrącenia magnezytu (MgCO₃) i kalcytu (CaCO₃; ryc. 1). Przemianę forsterytu (magnezowego oliwinu) w magnezyt, która zachodzi przy udziale wody zawierającej anion węglanowy i prowadzi do trwałego wiązania CO₂ w postaci ciała stałego, można opisać równaniem:



Oprócz magnezytu, który jest najbardziej pożądaną fazą ze względu na największą stabilność termodynamiczną wśród węglanów magnezu, w toku przedstawionej reakcji powstaje także krzemionka (SiO₂) oraz brucyt (Mg[OH]₂). Oczywiście jest to scenariusz rozpatrywany w zamkniętym, czteroskładnikowym systemie (MgO + SiO₂ + CO₂ + H₂O), a sam przebieg reakcji oraz jej produkty mogą się różnić w zależności od substratów, temperatury, ciśnienia i potencjału redoks.

W warunkach naturalnych przemiana krzemianów magnezu w węglany, wymagająca obecności CO₂, a tym samym prowadząca do jego trwałego wiązania w formie stałej, zachodzi w kilku określonych środowiskach. Dobrym przykładem skał, w których odbywa się ten proces, są

listwenity występujące w fragmentach płaszcza litosferycznego wyniesionych na powierzchnię wraz z innymi seriami skał metamorficznych, między innymi podczas wypiętrzania orogenów (Halls, Zhao, 2015). Ruchy tektoniczne towarzyszące temu procesowi często prowadzą do powstania sieci uskoków ułatwiających migrację fluidów, w tym tych bogatych w CO₂.

Badania izotopowe węglanów tworzących listwenity wykazały, że znajdujący się w nich węgiel jest w dużej mierze pochodzenia organicznego i jest uwalniany ze skał osadowych pograżanych na duże głębokości w strefach subdukcji (Menzel i in., 2024). To właśnie aktywne krawędzie płyt litosferycznych odgrywają kluczową rolę w globalnym obiegu CO₂, transportując węgiel skumulowany w skałach skorupy, oceanach i biosferze do płaszcza Ziemi. Szacuje się, że strefy subdukcji pochłaniają rocznie od 40 do 66 megaton węgla, z czego największy udział mają osady bogate w węglany i materię organiczną (Plank, Manning, 2019). Subdukcja ma ogromny wpływ na długoterminowy bilans CO₂, a tym samym na klimat, ponieważ kontroluje, jaka część węgla pozostaje w atmosferze, a jaka jest magazynowana w płaszczu. Jednak proces ten zachodzi na tyle wolno, że nie jest w stanie zrównoważyć ilości CO₂ emitowanej przez działalność człowieka.

Atmosferyczny CO₂ może być także usuwany przez skały ultramaficzne znajdujące się na powierzchni Ziemi. Proces ten jest szczególnie intensywny w warunkach klimatu tropikalnego, w którym temperatura i wilgotność przyspieszają rozkład krzemianów. Zjawisko wietrzenia perydotytów i serpentynitów w warunkach tropikalnych, zwane laterytyzacją, może prowadzić m.in. do powstawania laterytowych złóż niklu czy wietrzeniowych złóż magnezytu (Quesnel i in., 2016). Na przykład w wyniku intensywnego wietrzenia chemicznego ofiolitów Zambales i Angat na filipińskiej wyspie Luzon jest pochłanianych 127,6 ton CO₂ rocznie na każdy km² odsłaniających się skał (Schopka i in., 2011). Dla porównania, znajdujący się w północnych Włoszech masyw Voltri sekwestruje w ten

sposób zaledwie ok. 13,3 ton CO₂ rocznie (Froncini i in., 2019). Podobny mechanizm pochłaniania CO₂ zaobserwowano również w niektórych złożach antropogenicznych. Przykładem jest hałda po wydobyciu diamentów z intruzji kimberlitowej (*The Cullinan Diamond Mine*), która pochłania CO₂ bezpośrednio z atmosfery. Wtórne węglany wapnia i magnezu występują tam w postaci cementu łączącego pokruszone fragmenty skał (Jones i in., 2023).

Wietrzenie skał ultramaficznych to dobrze poznany, naturalny mechanizm wiązania CO₂, jednak jego efektywność w dużej mierze zależy od warunków klimatycznych. Proces ten, podobnie jak w strefach subdukcji, zachodzi zbyt wolno, by na bieżąco równoważyć emisję CO₂ wynikającą z działalności człowieka.

Zdolność perydotytów i serpentynitów do reagowania z CO₂ odgrywa istotną rolę w globalnym obiegu węgla, ale proces ten zachodzi bardzo wolno. W ludzkiej skali czasu skutki tego mechanizmu są niemal niezauważalne, mimo że Natura dostarcza nam namacalnych dowodów na jego skuteczność. Jednak stosując nowoczesne technologie, możemy przyspieszyć niektóre reakcje chemiczne i wykorzystać naturalny potencjał skał do sekwestracji CO₂.

TECHNOLOGIE UMOŻLIWIĄJĄCE WIĄZANIE CO₂ W SKAŁACH ULTRAMAFICZNYCH

W obliczu rosnącego stężenia CO₂ w atmosferze i konieczności przeciwdziałania zmianom klimatu, zarówno oddolnie, jak i systemowo, naturalne procesy nie są już wystarczającym rozwiązaniem. Dzięki nowoczesnym technologiom możliwe stało się przyspieszenie reakcji pozwalających na efektywne wiązanie CO₂ i jego trwałe usuwanie z atmosfery.

Jednym z pierwszych opracowań wskazujących na możliwość wykorzystania skał do usuwania CO₂ z atmosfery była krótka notatka szwajcarskiego fizyka Waltera Seifritza, opublikowana w 1990 r. na łamach czasopisma *Nature*. Badacz zauważył, że w procesie wietrzenia chemicznego krzemianów każdego roku jest wiązanych ok. 100 mln ton CO₂. Na tej podstawie oszacował, że w takim tempie naturalne procesy wietrzenia mogłyby pochłoniąć całą ilość dwutlenku węgla zawartego w atmosferze w ciągu ok. 7 tys. lat. Seifritz (1990) postulował także potrzebę przeprowadzenia eksperymentów polegających na zatłaczaniu CO₂ do specjalnie przygotowanych zbiorników wypełnionych wodą i sproszkowanymi skałami, aby sprawdzić, czy metoda ta umożliwi przyspieszenie rozkładu krzemianów i stanie się efektywnym sposobem usuwania antropogenicznego CO₂.

W kolejnych latach opublikowano liczne prace teoretyczne i eksperymentalne demonstrujące potencjał skał maficznych oraz ultramaficznych do sekwestracji CO₂. Wykazano w nich, że skała zdolna do trwałego wiązania CO₂ powinna się charakteryzować dużą zawartością reaktywnych krzemianów magnezu i wapnia oraz odpowiednią porowatością i przepuszczalnością, co znacznie zwiększa powierzchnię reakcji i umożliwia efektywną cyrkulację roztworów bogatych w CO₂, przyspieszając proces karbonatyzacji (Sanna i in., 2014; Kelemen i in., 2018; Rashid i in., 2023; Nisbet i in., 2024).

Wiele działań mających na celu wychwycenie, separację, transport i długoterminowe składowanie CO₂ obejmuje proces CCS (ang. *Carbon Capture and Storage*;

Snabjörnsdóttir i in., 2020). Jedną z technologii wykorzystywanych w ramach tego procesu jest mineralna karbonatyzacja. Polega ona na przekształceniu CO₂ w stabilne węglany w wyniku reakcji z minerałami zawierającymi magnez i wapń. W procesie tym CO₂ jest rozpuszczany w wodzie po to, aby mógł wejść w reakcję z kationami Mg²⁺ i Ca²⁺ uwalnianymi ze skały. Proces ten prowadzi do powstawania węglanów, takich jak kalcyt czy magnezyt. Mineralna karbonatyzacja może się odbywać zarówno *in situ*, czyli bezpośrednio w miejscu występowania reaktywnych skał, jak i *ex situ*, gdzie przeważnie wykorzystuje się wydobyty już materiał skalny lub bogate we wspomniane pierwiastki odpady przemysłowe.

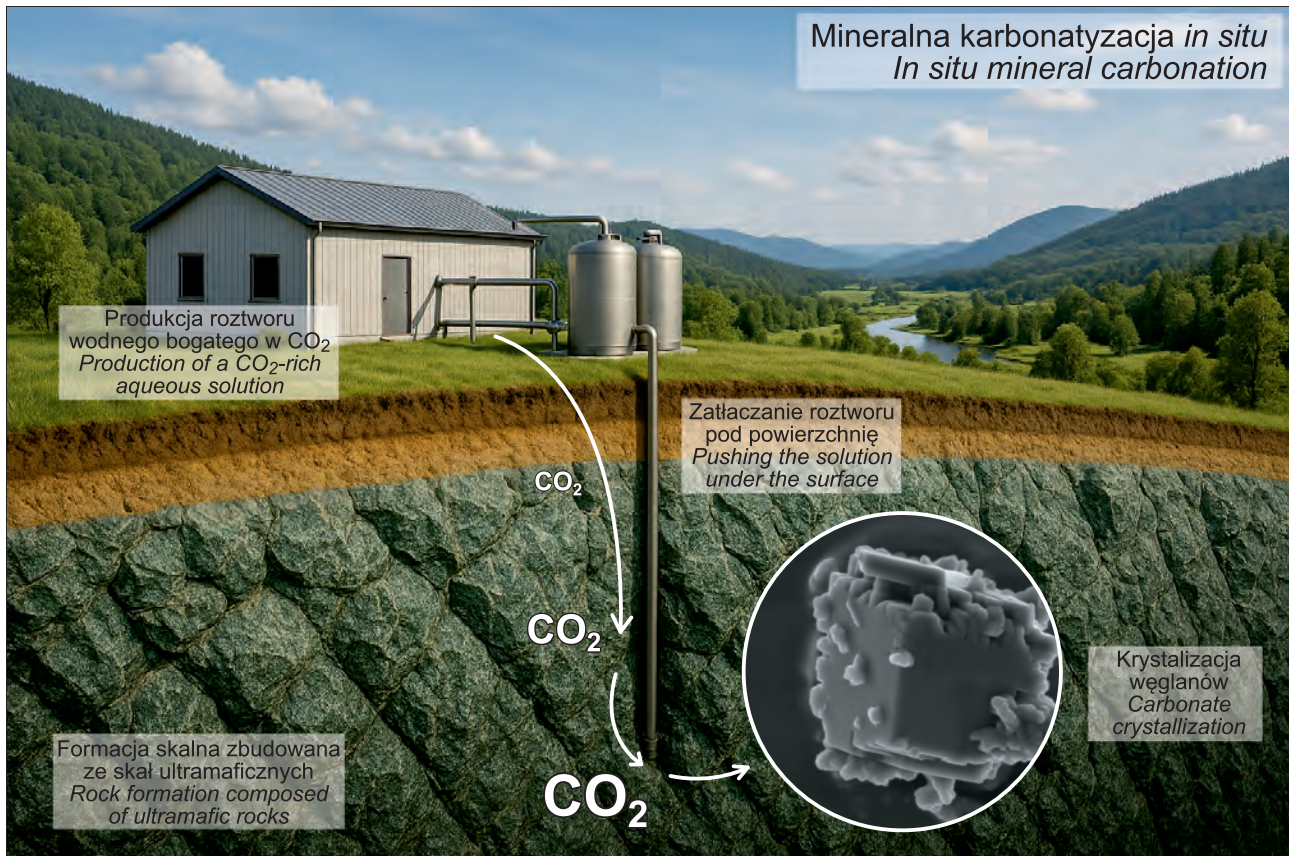
MINERALNA KARBONATYZACJA *IN SITU*

Mineralna karbonatyzacja *in situ* zachodzi w miejscu występowania skał maficznych lub ultramaficznych (ryc. 2). Do formacji skalnych zatłacza się roztwór wodny zawierający rozpuszczony CO₂. Roztwór ten krąży po górotworze i wchodzi w reakcję z jonami wapnia i magnezu. Metoda ta umożliwia trwałą sekwestrację CO₂ bez potrzeby transportu materiału skalnego, co sprzyja redukcji kosztów operacyjnych i emisji wtórnych (Yadav, Mehra, 2021; Alturki, 2022).

O skuteczności karbonatyzacji *in situ* świadczą osiągnięcia islandzkiej firmy *Carbfix*, która rocznie z powodzeniem zatłacza do bazaltowego górotworu ok. 12 000 ton CO₂, pompując go pod powierzchnię ziemi w formie rozpuszczonej w roztworze wodnym. Zaletą sekwestracji CO₂ w bazaltach jest naturalna porowatość tych skał, której zazwyczaj nie mają perydotyty ani serpentynity. Porowatość bazaltów umożliwia swobodne krążenie roztworów wysyconych CO₂, co zwiększa wydajność całego procesu. Efektywność sekwestracji CO₂ w bazaltach jest wyjątkowo duża, ponieważ ponad 95% CO₂ ulega mineralizacji w ciągu dwóch lat, a około 65% już po dwóch miesiącach od zatłoczenia (Snabjörnsdóttir i in., 2020).

Przykładem zastosowania technologii *in situ* jest także projekt realizowany w Omanie, w górach Hajar, który koncentruje się na mineralizacji CO₂ w częściowo zserpentyinizowanych perydotytach kompleksu ofiolitowego Samail. W trakcie pilotażowych badań osiągnięto mineralizację 88% zatłoczonego CO₂ w ciągu 45 dni, a projekt rozwija się w kierunku komercyjnego magazynowania milionów ton CO₂ (Kolahchian, 2024).

Mineralna karbonatyzacja *in situ* ma zarówno istotne zalety, jak i pewne ograniczenia. Jej głównym atutem jest brak konieczności transportu i mechanicznej obróbki skał, co znacząco redukuje koszty i jest pozbawione emisji gazów cieplarnianych. Nie następuje także emisja minerałów azbestowych i azbestopodobnych, często występujących w serpentynitach (McCutcheon i in., 2017). Proces mineralnej karbonatyzacji *in situ* pozwala na trwałe składowanie CO₂ w formacjach skalnych. Ograniczeniem metody jest głównie konieczność znalezienia odpowiednich formacji skalnych o właściwym składzie chemicznym i cechach teksturalnych, co znacznie zawęża możliwość jej zastosowania. Kolejną trudnością jest konieczność kontrolowania procesów podziemnych, co wymaga zaawansowanego monitoringu geochemicznego i geofizycznego, aby uniknąć potencjalnych zagrożeń, takich jak zmiany stabilności gruntu lub niekontrolowane migracje płynów.



Ryc. 2. Mineralna karbonatyzacja *in situ*. Dwutlenek węgla rozpuszczony w roztworze wodnym jest zatłaczany do skał ultramaficznych. W wyniku reakcji roztworu z minerałami w skałach tych wytrącają się węglany trwale wiążące CO₂. Elementy grafiki wygenerowano z wykorzystaniem narzędzi AI

Fig. 2. *In situ* mineral carbonation. Carbon dioxide dissolved in aqueous solution is injected into ultramafic rocks, where it reacts with rock-forming minerals, resulting in the precipitation of carbonates and the permanent sequestration of CO₂. The graphic was partially generated using AI-based tools

MINERALNA KARBONATYZACJA *EX SITU*

Technologia *ex situ* to proces, w którym wychwycony CO₂ reaguje z minerałami poza miejscem ich naturalnego występowania. W przeciwieństwie do metody *in situ* sekwestracja CO₂ zachodzi na powierzchni ziemi. Wydobyty materiał skalny (np. skały płonne z hałdy) lub odpady przemysłowe (np. żużel stalowniczy, popioły, materiały cementowe) są transportowane do miejsca, w którym odpowiednia infrastruktura umożliwia sekwestrację CO₂ (ryc. 3).

Od kilku lat w Australii są prowadzone badania nad potencjałem mineralnej karbonatyzacji *ex situ* jako strategii dekarbonizacji sektora wydobywczego i odzysku cennych pierwiastków. Istotnym kierunkiem badań jest wykorzystanie odpadów górniczych powstałych w wyniku eksploatacji skał ultramaficznych. W ramach inicjatyw badawczych *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) i australijskich uniwersytetów są opracowywane metody integracji karbonatyzacji z odzyskiem metali krytycznych, co mogłoby zwiększyć opłacalność tej technologii (Milani i in., 2023).

Metoda *ex situ* umożliwia bardziej precyzyjne kontrolowanie warunków reakcji, jednak jej wdrożenie wymaga budowy infrastruktury umożliwiającej przeprowadzenie reakcji na powierzchni ziemi (np. instalacji specjalistycznych reaktorów). Wiąże się to z dodatkowymi kosztami i zmniejsza opłacalność stosowania tej technologii. Mine-

ralna karbonatyzacja *ex situ* odpadów może jednak stanowić element zintegrowanego podejścia do sekwestracji CO₂, umożliwiającą zagospodarowanie odpadów przemysłowych (Sanna i in., 2014).

PRZYSPIESZONE WIETRZENIE SKAŁ ULTRAMAFICZNYCH

Inną metodą usuwania CO₂ za pomocą skał ultramaficznych jest tak zwane przyspieszone wietrzenie skał (ang. *enhanced rock weathering*). Jest to metoda geoinżynierska polegająca na intensyfikacji wietrzenia krzemianów, głównie Ca i Mg, które następnie reagują z atmosferycznym CO₂, przeważnie rozpuszczonym w wodzie opadowej (Schuiling, Krijgsman, 2006; Beerling i in., 2020). Skutecznym sposobem przyspieszenia tego procesu jest mechaniczne rozdrabnianie skał, ponieważ zwiększenie ich powierzchni właściwej intensyfikuje rozpuszczanie i reakcję z CO₂. Celem działania, podobnie jak w przypadku mineralnej karbonatyzacji, jest trwałe związanie tego gazu cieplarnianego w węglanach (Renforth, 2012). Choć prace nad tą metodą wciąż trwają, to już dzisiaj wiadomo, że przyspieszone wietrzenie skał zmniejsza stężenie CO₂ w powietrzu. Jedną z metod sekwestracji CO₂ za pomocą przyspieszonego wietrzenia skał mogło by być wzbogacanie nawozów rolniczych w rozdrobnione skały ultramaficzne zawierające minerały wapnia i magnezu. W ten sposób można by było rozproszyć te minerały na dużych

obszarach, gdzie stopniowo by wietrzały, pochłaniając CO₂ zarówno z atmosfery, jak i z wody opadowej. Obecnie są prowadzone badania mające na celu określenie stabilności węglanów powstających w tym procesie (Abdalqadir i in., 2024). W celu usuwania CO₂ jest rozważane również rozprawianie rozdrobnionych skał ultramaficznych i maficznych na obszarach leśnych lub plażach (Vandeginste i in., 2024). Jednym z głównych wyzwań jest niepewność skuteczności tej metody w skali przemysłowej. Reakcje chemiczne zachodzące pomiędzy rozdrobnionymi skałami a glebą mogą być skomplikowane i trudne do przewidzenia (Jagoutz, Krol, 2023). Wprowadzenie zwietrzałych skał ultramaficznych do gleb użytkowanych rolniczo może prowadzić do wzbogacenia ich w metale, takie jak Ni, Cr i Co, zwiększając ryzyko ich migracji do wód gruntowych oraz bioakumulacji w niektórych roślinach uprawnych. Dodatkowym zagrożeniem dla ludzi i środowiska naturalnego jest możliwość utlenienia jonu Cr³⁺ do toksycznej formy Cr⁶⁺ (Kierczak i in., 2021).

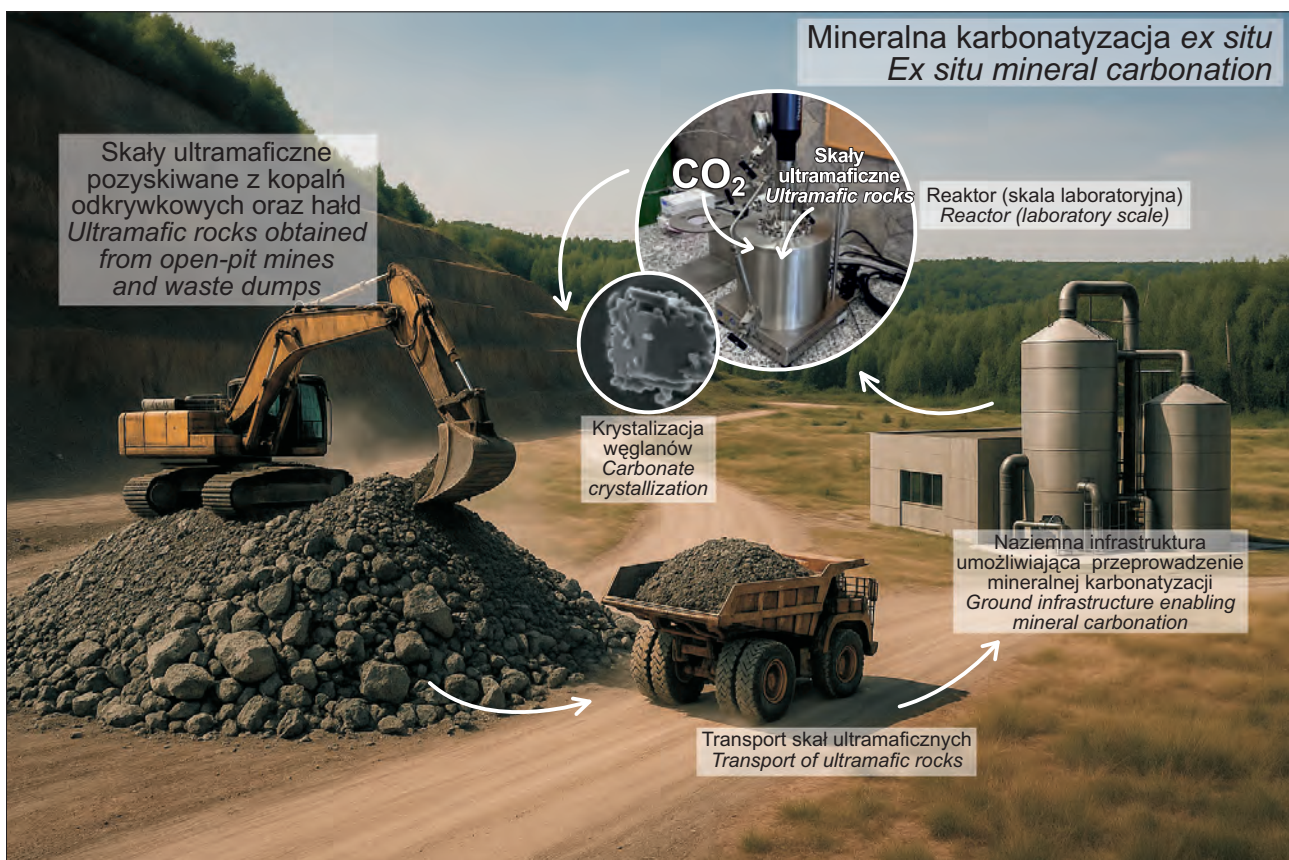
Technologię przyspieszonego wietrzenia komercyjnie wdrożyła australijska firma *Arca*, która do sekwestracji CO₂ wykorzystuje odpady z kopalni niklu, zawierające duże ilości minerałów z grupy serpentynu. Odpady te po rozdrobnieniu ulegają procesowi wietrzenia chemicznego, który firma *Arca* przyspiesza poprzez przednią aktywację minerałów za pomocą promieniowania mikrofalowego. Dzięki temu zabiegowi zwiększa się reaktywność substra-

tu, co poprawia efektywność wychwytywania CO₂ (Lynch, 2025).

Przyspieszone wietrzenie jest obiecującą metodą sekwestracji CO₂, jednak proces ten składa się z kilku etapów: selekcji odpowiednich skał, ich rozdrabniania w celu zwiększenia powierzchni reakcji, a następnie rozprzestrzeniania zmielonego materiału na powierzchni ziemi i jego wietrzenia. Istotną rolę odgrywa także pH, które wpływa na wytrącanie się węglanów i reakcje zwrotne kształtujące dynamikę całego procesu (Vandeginste i in., 2024). Każdy z tych etapów wymaga szczegółowych badań oraz nieustannego monitorowania, aby zapewnić optymalną efektywność i zminimalizować ewentualne negatywne skutki oddziaływania na środowisko.

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SKAŁ ULTRAMAFICZNYCH DO SEKWESTRACJI CO₂ W POLSCE

Polska jest krajem zależnym od węgla i słabo zaawansowanym w procesie transformacji energetycznej (Michalik, Zieliński, 2024). W Europie pod względem całkowitej emisji gazów cieplarnianych nasz kraj zajmuje czwarte miejsce, jednak w przeliczeniu na jednego mieszkańca plasuje się na szóstej pozycji. Uwzględniając emisje z gospodarstw domowych, w 2023 r. Polska wyemitowała 377 mln ton ekwiwalentu CO₂. To o 25,6 mln ton (czyli 6,3%)



Ryc. 3. Mineralna karbonatyzacja *ex situ*. Skały ultramaficzne (lub odpady) i CO₂ są transportowane do odpowiedniej instalacji, gdzie poddaje się je karbonatyzacji w warunkach kontrolowanych. Fotografia przedstawia laboratoryjny reaktor będący na wyposażeniu pracowni mineralnej karbonatyzacji na Uniwersytecie Wrocławskim. Elementy grafiki wygenerowano z wykorzystaniem narzędzi AI
Fig. 3. *Ex situ* mineral carbonation. Ultramafic rocks (or waste materials), along with CO₂, are transported to specialized facilities, where they undergo carbonation under controlled conditions. The inserted photograph shows a laboratory reactor that is part of the mineral carbonation research infrastructure under development at the University of Wrocław. The graphic was partially generated using AI-based tools

mniej niż rok wcześniej (Frączyk, 2025). Podpisując międzynarodowe porozumienia klimatyczne, w tym Protokół z Kioto czy Porozumienie Paryskie, rząd polski zobowiązał się do stopniowego redukowania emisji CO₂. W ramach pakietu legislacyjnego *Fit for 55* Unia Europejska przyjęła cel redukcji emisji gazów cieplarnianych netto o co najmniej 55% do 2030 r. względem poziomu z 1990 r. W obszarze przeciwdziałania zmianom klimatu polityka Unii Europejskiej obejmuje nie tylko projekty ukierunkowane na redukcję emisji gazów cieplarnianych, lecz także wspierające rozwój nowoczesnych technologii usuwania nadmiaru CO₂ z atmosfery, w tym wykorzystujących potencjał sekwestracyjny skał ultramaficznych. Stosowanie tych metod wpisuje się w realizację międzynarodowych zobowiązań Polski do przeciwdziałania zmianom klimatycznym i redukcji emisji CO₂.

W Polsce skały ultramaficzne występują na powierzchni ziemi lub na niewielkiej głębokości wyłącznie w bloku przedsudeckim. Skały te należą do ofiolitu śródsudeckiego, który stanowi fragment późnodewońskiej skorupy oceanicznej. Ultramafitami tej sekwencji ofiolitowej są przede wszystkim zserpentynizowane w różnym stopniu perydoty. Największe wystąpienia tych skał znajdują się w rozdzielonych tektonicznie masywach Gogołów–Jordanów, Szklary oraz Braszowice–Brzeźnica (Wojtulek i in., 2022). W masywach tych jest prowadzona działalność górnicza. W kilku kopalniach odkrywkowych są wydobywane magnezyt i kruszywo mineralne. W przeszłości eksploatowano także chromity i laterytowe rudy niklu (Madziarz, Sztuk, 2007; Cieślak i in., 2022). Pozostałością po historycznej i współczesnej działalności wydobywczej są różne odpady, które mogą być istotnym źródłem metali ziem alkalicznych. Przykładem są żużle na hałdzie po dawnej hucie niklu w Szklarach, w których zawartość CaO dochodzi nawet do 58% wag. (Kierczak i in., 2009). Żużle tego typu, ze względu na bardzo dużą zawartość wapnia, są cennym surowcem do sekwestracji CO₂ w procesie mineralnej karbonatyzacji *ex situ*.

W przyszłości do sekwestracji CO₂ metodą mineralnej karbonatyzacji mogą być wykorzystane również skały ultramaficzne należące do sekwencji ofiolitowej Sudetów. Szacunkowe wyliczenia wskazują, że cztery udokumentowane złoża serpentynitów w masywach Gogołów–Jordanów, Braszowice–Brzeźnica i Szklary zawierają łącznie

ok. 79,4 mln Mg tych skał. Stosując współczynnik sorpcyjny $R_{CO_2} \approx 2,3$ Mg skały na 1 Mg CO₂ wyliczono, że pełne wykorzystanie tych zasobów pozwoliłoby mineralnie związać blisko 34,5 mln Mg CO₂ (Uliasz-Bocheńczyk, Mokrzycki, 2014). Dotychczasowe badania eksperymentalne, przeprowadzone na częściowo zserpentynizowanych perydotytach pochodzących z masywu Braszowice–Brzeźnica wykazały, że do niemal całkowitego rozpuszczenia forsterytu, w temperaturze 185°C i w obecności roztworu wodnego nasyconego dwutlenkiem węgla, dochodzi po upływie 96 godzin. W wyniku mineralnej karbonatyzacji prawie połowę końcowej masy próbki (ok. 46% wag.) stanowi magnezyt, który jest głównym produktem reakcji (Cieślak i in., 2025).

Potencjał sekwestracyjny skał ultramaficznych (C_{pot}), wyrażany jako liczba kilogramów CO₂ możliwych do związania przez tonę skały, można oszacować eksperymentalnie, ale również metodą obliczeniową, która polega na założeniu całkowitego przekształcenia magnezu i wapnia obecnych w skale w węglany (Renforth, 2019). Po odpowiednim zmodyfikowaniu, uwzględniającym cechy skał ultramaficznych, równanie to można przedstawić w następującej postaci:

$$C_{pot} = 440 \times \left(\alpha \frac{CaO}{M_{CaO}} + \beta \frac{MgO}{M_{MgO}} \right)$$

gdzie:

- 440 – współczynnik przeliczeniowy wynikający z masy molowej CO₂ (44 g/mol);
- CaO i MgO – zawartość tlenków wapnia i magnezu w skale (wyrażona w % wagowych), natomiast M_{CaO} i M_{MgO} to ich masy molowe;
- α i β – współczynniki określające, jaka część danego tlenku faktycznie uczestniczy w procesie karbonatyzacji.

Stosując ten wzór, wyliczono potencjał sekwestracyjny (C_{pot}) wybranych skał ultramaficznych Sudetów (tab. 1). Wartość współczynników α i β przyjęto jako 1. Wyliczone wartości potencjału sekwestracyjnego tych skał pokazują, że zdolność wiązania CO₂ jest ściśle uzależniona od zawartości MgO (tab. 1). Im większa zawartość tlenku magnezu w skale, tym większy teoretyczny potencjał sekwestracyjny.

Tab. 1. Potencjał sekwestracyjny (C_{pot}) wybranych skał ultramaficznych Sudetów
Table 1. Sequestration potential (C_{pot}) of selected ultramafic rocks of Sudety Mts.

Lokalizacja <i>Location</i>	Litologia <i>Lithology</i>	CaO [% wag.]*	MgO [% wag.]*	C_{pot} [Kg CO ₂ × t ⁻¹]
Masyw Szklar <i>Szklary Massif</i>	zserpentynizowany perydotyt <i>serpentinized peridotite</i>	0,30	31,3	344,1
Przemilów	serpentynit <i>serpentinite</i>	0,01	36,5	398,5
Radunia	serpentynit <i>serpentinite</i>	0,01	36,9	402,9
Jordanów	serpentynit <i>serpentinite</i>	0,02	33,8	369,1
Żmijowiec	serpentynit <i>serpentinite</i>	0,02	36,0	393,2
Wzgórze Popiel <i>Popiel Hill</i>	hornblendowy perydotyt <i>hornblende peridotite</i>	4,10	29,4	353,1

* zawartość CaO i MgO w skałach wg Kierczaka i in. (2016) / *CaO and MgO content in rocks after Kierczak et al. (2016)*

Potwierdzeniem tego jest duży potencjał sekwestracyjny (C_{pot}) serpentynitów z Raduni i Przemilowa, osiągający $\sim 400 \text{ kg CO}_2 \times \text{t}^{-1}$. W większości analizowanych skał ultramaficznych Sudetów udział CaO jest mały i nie wpływa istotnie na wartości C_{pot} . Należy jednak podkreślić, że w obliczeniach przyjęto wysoce optymistyczny scenariusz, w którym zakłada się całkowite wykorzystanie MgO i CaO występujących w skale. W rzeczywistości efektywność procesu karbonatyzacji, na którą wpływają liczne czynniki, jest o wiele mniejsza.

Dotychczasowe wyniki wyliczeń teoretycznych i badań eksperymentalnych wskazują, że minerały skał ultramaficznych w Sudetach, zwłaszcza oliwin, charakteryzują się silną podatnością na mineralną karbonatyzację w warunkach *ex situ*. Dotychczas nie badano efektywności mineralnej karbonatyzacji *in situ*, jednak zagadnienie to stanowi interesujący kierunek przyszłych prac i zasługuje na szczególną uwagę środowiska naukowego, a także podmiotów zainteresowanych rozwojem i wdrożeniem tej technologii. Dalsze prace eksperymentalne mogą doprowadzić do lepszego określenia i pełnego wykorzystania potencjału sekwestracyjnego drzemającego w skałach ultramaficznych. Należy jednak pamiętać, że kluczowym warunkiem skuteczności tej metody sekwestracji CO_2 jest zapewnienie, iż emisja tego gazu, związana np. z wytwarzaniem energii potrzebnej do osiągnięcia wysokiej temperatury w reaktorze, nie przekroczy ilości CO_2 , która zostanie zmineralizowana do postaci węglanów.

PODSUMOWANIE

W obliczu narastających wyzwań powodowanych przez ocieplenie klimatu jednym z kluczowych obszarów badań naukowych staje się trwałe usuwanie antropogenicznej nadwyżki CO_2 z atmosfery. Jedną z obiecujących metod sekwestracji CO_2 , umożliwiających jego trwałe związanie w postaci węglanów, jest mineralna karbonatyzacja z wykorzystaniem skał ultramaficznych. W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie tą technologią również w Polsce. Przykładem są badania eksperymentalne prowadzone na Uniwersytecie Wrocławskim, które koncentrują się m.in. na ocenie potencjału skał ultramaficznych bloku przedsudeckiego i powiązanych z nimi odpadów przemysłowych jako materiałów nadających się do usuwania CO_2 z atmosfery zarówno w warunkach *ex situ*, jak i *in situ*. Badania te są ważnym krokiem w kierunku zastosowania na większą skalę rozwiązań w tzw. geoinżynierii klimatycznej, która jest stosunkowo nową dziedziną badań. Biorąc pod uwagę rozmaite zagrożenia związane ze zmianami klimatu, temat ten powinien zyskać większe zainteresowanie także w innych ośrodkach naukowo-badawczych w kraju. Pomimo obiecujących wyników technologia ta nadal boryka się z wieloma wyzwaniami. Dotyczą one przede wszystkim niewielkiej porowatości i ograniczonej przepuszczalności skał ultramaficznych (metoda *in situ*), a także zróżnicowanej reaktywności minerałów skałotwórczych (metoda *in situ* i *ex situ*). Istotnym zagadnieniem pozostaje także mobilizacja metali przejściowych (Ni, Cr, Co), która towarzyszy procesowi karbonatyzacji, a do dziś nie została w pełni rozpoznana. Rozwój technologii mineralnej sekwestracji CO_2 , wraz z towarzyszącymi jej badaniami podstawowymi, obejmuje nie tylko zagadnienia geochemiczne i mineralogiczne, ale wymaga także współpracy ze

specjalistami w dziedzinie inżynierii materiałowej czy ochronie środowiska. Tylko takie podejście pozwoli na usprawnienie technologii, której wdrożenie będzie możliwe w przyszłości.

Autorzy pragną wyrazić serdeczne podziękowania Profesorowi Januszowi Janeczkiowi za merytoryczną dyskusję oraz cenne uwagi, które znacząco wzbogaciły niniejszą pracę. Dziękujemy również dr. hab. Jakubowi Kierczakowi za rozmaite sugestie i wskazówki. Artykuł powstał w ramach realizacji projektów badawczych NCN OPUS (UMO-2021/43/B/ST10/01594) oraz NCN PRELUDIUM (UMO-2022/45/N/ST10/00879).

LITERATURA

- ABDALQADIR M., HUGHES D., REZAEI GOMARI S., RAFIQ U. 2024 – A state of the art review on factors affecting the enhanced weathering in agricultural soil: strategies for carbon sequestration and climate mitigation. *Environmental Science and Pollution Research*, 31: 19047–19070.
- ALTURKI A. 2022 – The global carbon footprint and how new carbon mineralization technologies can be used to reduce CO_2 emissions. *Chemical Engineering Journal*, 6, 44.
- BEERLING D.J., KANTZAS E.P., LOMAS M.R., WADE P., EUFRASIO R.M., RENFORTH P., BANWART S.A. 2020 – Potential for large-scale CO_2 removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 583: 242–248.
- BREMEN A.M., PLOCH T., MHAMDI A., MITSOS A. 2021 – A mechanistic model of direct forsterite carbonation. *Chemical Engineering Journal*, 404, 126480.
- CANADELL J.G., MONTEIRO P.M., COSTA M.H., COTRIM DA CUNHA L., COX P.M., ELISEEV A.V., HENSON S., ISHII M., JAC-CARD S., KOVEN C., LOHILA A., P.K. PATRA, PIAO S., ROGELJ J., SYAMPUNGANI S., ZAEHLE S., ZICKFELD K. 2023 – Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge Univ. Press, Cambridge: 673–816.
- CAO L., CALDEIRA K. 2010 – Atmospheric carbon dioxide removal: long-term consequences and commitment. *Environmental Research Letters*, 5, 024011.
- CHEN J.M. 2021 – Carbon neutrality: toward a sustainable future. *The Innovation*, 2 (3), 100127.
- CIEŚLIK B., KIERCZAK J., PIETRANIK A. 2022 – Mineralogical and geochemical evidence for two-stage silicification of serpentized peridotites from the Szklary Massif (NE Bohemian Massif). *Mineralogia*, 53.
- CIEŚLIK B., LACINSKA A., PIETRANIK A., RÓZIEWICZ M., PĘDZIWIATR A., TURNIAK K., ŁAMACZ A., KIERCZAK J. 2025 – Nickel mobilization during single-stage aqueous mineral carbonation of serpentized peridotite at 185°C and PCO_2 of 100 bar. *Journal of CO_2 Utilization*, 97, 103119.
- FRĄCZYK J. 2025 – Polacy wcale nie emitują najwięcej CO_2 w Europie. Przed nami pięć krajów, w tym Dania. *Business Insider Polska*, 13.01.2025 r.
- FRONDINI F., VASELLI O., VETUSCHI ZUCCOLINI M. 2019 – Consumption of atmospheric carbon dioxide through weathering of ultramafic rocks in the Voltri Massif (Italy): quantification of the process and global implications. *Geosciences*, 9, 258.
- FU L., REN Z., SI W., MA Q., HUANG W., LIAO K., HUANG Z., WANG Z., LI J., XU P. 2022 – Research progress on CO_2 capture and utilization technology. *Journal of CO_2 Utilization*, 66, 102260.
- HALLS C., ZHAO R. 1995 – Listvenite and related rocks: perspectives on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at Cregganbaun, Co. Mayo, Republic of Ireland. *Mineralium Deposita*, 30: 303–313.
- HIRATA A., OHASHI H., HASEGAWA T., FUJIMORI S., TAKAHASHI K., TSUCHIYA K., MATSUI T. 2024 – The choice of land-based climate change mitigation measures influences future global biodiversity loss. *Commun. Earth Environment*, 5, 259.
- JAGOUTZ O., KRÖL A. 2023 – Enhanced rock weathering. MIT Climate Portal; <https://climate.mit.edu>
- JONES T.R., POITRAS J., PATERSON D., SOUTHAM G. 2023 – Historical diamond mine waste reveals carbon sequestration resource in kimberlite residue. *Chemical Geology*, 617, 121270.
- KELEMEN P.B., AINES R., BENNETT E., BENSON S.M., CARTER E., COGGON J.A., DE OBESO J.C., EVANS O., GADIKOTA G., DIPPLE G.M., GODARD M., HARRIS M., HIGGINS J.A., JOHNSON K.T.M., KOURIM F., LAFAY R., LAMBART S., MANNING C.E.,

- MATTER J.M., MICHIBAYASHI K., MORISHITA T., NOËL J., OKAZAKI K., RENFORTH P., ROBINSON B., SAVAGE H., SKARBEK R., SPIEGELMAN M.W., TAKAZAWA E., TEAGLE D., URAI J.L., WILCOX J. (the Oman Drilling Project Phase 1 Scientific Party) 2018 – In situ carbon mineralization in ultramafic rocks: Natural processes and possible engineered methods. *Energy Procedia*, 146: 92–102.
- KIERCZAK J., NEEL C., PUZIEWICZ J., BRIL H. 2009 – The mineralogy and weathering of slag produced by the smelting of lateritic Ni ores, Szklary, SW Poland. *The Canadian Mineralogist*, 47: 557–572.
- KIERCZAK J., PĘDZIWIATR A., WAROSZEWSKI J., MODELSKA M. 2016 – Mobility of Ni, Cr and Co in serpentine soils derived on various ultrabasic bedrocks under temperate climate. *Geoderma*, 268: 78–91.
- KIERCZAK J., PIETRANIK A., PĘDZIWIATR A. 2021 – Ultramafic geoecosystems as a natural source of Ni, Cr and Co to the environment: a review. *Science of the Total Environment*, 755, 142620.
- KOLAHCHIAN E., JAGGER M., MAHZARI P., MOL A., MATTER J. 2024 – A monitoring, measurement, reporting and verification framework for in-situ CO₂ mineralisation. *Proc. 17th Int. Conf. Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-17)*, 20–24.10.2024, Calgary.
- LE BAS M.J., STRECKEISEN A.L. 1991 – The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society*, 148: 825–833.
- LYNCH J. 2025 – BHP mine shows how tailings can become a climate-change-fighting “super-power”. *The Australian*, 19.02.2025 r.
- MADZIARZ M., SZTUK H. 2007 – Eksploatacja małego złoża na tle wielkich wydarzeń – rzecz o kopalni chromitu w Tapadłach. *WUG: Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 4: 42–43.
- MARKS L. 2025 – Contemporary global warming versus climate change in the Holocene. *Przegląd Geologiczny*, 73 (2): 170–176.
- MCCUTCHEON J., TURVEY C.C., WILSON S., HAMILTON J.L., SOUTHAM G. 2017 – Experimental deployment of microbial mineral carbonation at an asbestos mine: potential applications to carbon storage and tailings stabilization. *Minerals*, 7 (10), 191.
- MENZEL M.D., SIEBER M.J., GODARD M. 2024 – From peridotite to listvenite – perspectives on processes, mechanisms and settings of ultramafic mineral carbonation to quartz-magnesite rocks. *Earth-Science Reviews*, 255, 104828.
- MICHALIK S., ZIELIŃSKI D. 2024 – Transformacja energetyczna w Polsce w świetle strategicznych dokumentów rządowych. Sieć Badawcza Łukasiewicz-ITECH Instytut Innowacji i Technologii, Warszawa.
- MILANI D., McDONALD R., FAWELL P., WELDEKIDAN H., PUXTY G., FERON P. 2023 – Ex-situ mineral carbonation process challenges and technology enablers: a review from Australia’s perspective. *Science of the Total Environment*, 866, 161585.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 2025 – Global greenhouse gas reference network: CO₂ trends; <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- NISBET H., BUSCARNERA G., CAREY J.W., CHEN M.A., DETOURNAY E., HUANG H., HYMAN J.D., KANG P.K., KANG Q., LABUZ J.F., LI W., MATTER J., NEIL C.W., SRINIVASAN G., SWEENEY M.R., VOLLER V.R., YANG W., YANG Y., VISWANATHAN H.S. 2024 – Carbon mineralization in fractured mafic and ultramafic rocks: A review. *Reviews of Geophysics*, 62 (4), e2023RG000815.
- PLANK T., MANNING C.E. 2019 – Subducting carbon. *Nature*, 574: 343–352.
- POROZUMIENIE paryskie do Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, sporządzonej w Nowym Jorku dnia 9 maja 1992 r., przyjęte w Paryżu dnia 12 grudnia 2015 r. Dz.U. 2017 poz. 36.
- QUESNEL B., BOULVAIS P., GAUTIER P., CATHELINÉAU M., JOHN C.M., DIERICK M., AGRINIER P., DROUILLET M. 2016 – Paired stable isotopes (O, C) and clumped-isotope thermometry of magnesite and silica veins in the New Caledonia Peridotite Nappe. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 183: 234–249.
- RASHID M.I., YAQOOB Z., MUJTABA M.A., FAYAZ H., SALEEL C.A. 2023 – Developments in mineral carbonation for carbon sequestration. *Heliyon*, 9 (11), e21796.
- RENFORTH P. 2012 – The potential of enhanced weathering in the UK. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 10: 229–243.
- SANNA A., UIBU M., CARAMANNA G., KUUSIK R., MAROTO-VALER M.M. 2014 – A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂. *Chemical Society Reviews*, 43: 8049–8080.
- SCHOPKA H.H., DERRY L.A., ARCILLA C.A. 2011 – Chemical weathering, river geochemistry and atmospheric carbon fluxes from volcanic and ultramafic regions on Luzon Island (Philippines). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 978–1002.
- SCHRENK M.O., BRAZELTON W.J., LANG S.Q. 2013 – Serpentinization, carbon and deep life. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75: 575–606.
- SCHÜLLING R.D., KRIJGSMAN P. 2006 – Enhanced weathering: an effective and cheap tool to sequester CO₂. *Climatic Change*, 74: 349–354.
- SEIFRITZ W. 1990 – CO₂ disposal by means of silicates. *Nature*, 345, 486.
- SNÆBJÖRNSDÓTTIR S.Ó., SIGFÚSSON B., MARIENI C., GOLDBERG D., GÍSLASON S.R., OELKERS E.H. 2020 – Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1: 90–102.
- SUMMERHAYES C., HEAD M.J., GAŁUSZKA A., FIAŁKIEWICZ-KOZIEŁ B., WATERS C.N., ROBIN L., SÓRLIN S., CEARRTA A., WALLENHORST N., ZALASIEWICZ J. 2025 – Response to Marks (2025): Contemporary global warming versus climate change in the Holocene. *Przegląd Geologiczny*, 73 (5): 469–476.
- ULIASZ-BOCHENCZYK A., MOKRZYCKI E. 2014 – Mineralna karbonatyzacja przy zastosowaniu surowców naturalnych metodą redukcji CO₂. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 30: 99–110.
- VANDEGINSTE V., LIM C., JI Y. 2024 – Exploratory review on environmental aspects of enhanced weathering as a carbon dioxide removal method. *Minerals*, 14, 75.
- WOJTULEK P.M., SCHULZ B., KLEMD R., GIL G., DAJEK M., DELURA K. 2022 – The Central-Sudetic ophiolites – remnants of SSSZ-type Devonian oceanic lithosphere in the European part of the Variscan Orogen. *Gondwana Research*, 105: 343–365.
- WRIGLEY E.A. 2013 – Energy and the English industrial revolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371, 20110568.
- YADAV S., MEHRA A. 2021 – A review on ex-situ mineral carbonation. *Environmental Science and Pollution Research*, 28: 12202–12231.

Praca wpłynęła do redakcji 28.05.2025 r.
Akceptowano do druku 24.09.2025 r.