

Zdzisław M. Migaszewski  
Agnieszka Gałuszka

# GEOCHEMIA ŚRODOWISKA



Rodzicom i naszym Nauczycielom  
oraz wszystkim tym, którzy nie poddają się przeciętności,  
dedykujemy tę książkę

„Naturalnie, człowiek potrzebuje murów, w których spoczywa  
jak ziarno w ziemi. Ale potrzebuje także bezkresnej Mlecznej Drogi  
i przestrzeni morza, choć ani gwiazdne konstelacje, ani ocean  
nie służą mu w danej chwili na nic...”

*A. de Saint-Exupéry*  
„Twierdza”

Projekt okładki i stron tytułowych **Bartosz Dobrowolski**

Ilustracja na okładce **tankbmb/iStock**

Wydawca **Katarzyna Włodarczyk-Gil**

Koordynator ds. redakcji **Iwona Lewandowska**

Redaktor **Marianna Gadkowska**

Produkcja **Mariola Grzywacka**

Źródła ilustracji **Zdzisław Migaszewski, Agnieszka Gałuszka**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo.

Więcej na [www.legalnakultura.pl](http://www.legalnakultura.pl)

*Polska Izba Książki*

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA  
Warszawa 2016

ISBN 978-83-01-18677-7

Wydanie I  
Warszawa 2016

Wydawnictwo Naukowe PWN SA  
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2  
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288  
infolinia 801 33 33 88  
e-mail: [pwn@pwn.com.pl](mailto:pwn@pwn.com.pl), [www.pwn.pl](http://www.pwn.pl)

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o. o.

# Spis treści

Wstęp .....	11
<b>Część I. Interdyscyplinarne podstawy geochemii środowiska</b>	
<b>1. Od klasycznej geochemii do geochemii i analityki środowiska – rys historyczny .....</b>	<b>17</b>
<b>2. Geochemia środowiska – przegląd problematyki .....</b>	<b>27</b>
2.1. Geochemia środowiska na tle innych dyscyplin geochemii .....	27
2.2. Charakterystyka i zakres badań geochemii środowiska .....	32
2.3. Podstawowe cele i kierunki rozwoju geochemii środowiska ..	35
<b>3. Charakterystyka geochemiczna stref kuli ziemskiej .....</b>	<b>40</b>
3.1. Najważniejsze wydarzenia w dziejach Ziemi – wyzwanie dla geochemika .....	40
3.2. Budowa Ziemi i Księżyca .....	44
3.3. Zewnętrzne strefy Ziemi .....	47
3.3.1. Hydrosfera .....	47
3.3.2. Pedosfera .....	52
3.3.3. Atmosfera .....	55
3.3.4. Biosfera .....	57
<b>4. Tektonika płyt – klucz do zrozumienia wielkoskalowego obiegu pierwiastków .....</b>	<b>64</b>
4.1. Uwagi wstępne .....	64
4.2. Granice płyt tektonicznych .....	66
4.3. Znaczenie tektoniki płyt w naukach przyrodniczych .....	68
<b>5. Oceaniczne źródła hydrotermalne – miejsca występowania złóż metali i unikatowych ekosystemów .....</b>	<b>71</b>
5.1. Uwagi wstępne .....	71
5.2. Skład chemiczny i izotopowy oceanicznych źródeł hydrotermalnych .....	73
5.3. Ekosystemy oceanicznych źródeł hydrotermalnych .....	77
<b>6. Czynniki geochemiczne i klasyfikacje pierwiastków .....</b>	<b>84</b>
6.1. Podstawowe pojęcia z zakresu krystalografii, mineralogii i petrologii .....	84
6.2. Podstawowe parametry i czynniki geochemiczne .....	91
6.2.1. Klarki a współczynniki zawartości pierwiastków .....	91

6.2.2.	Zawartości naturalne i modyfikujący wpływ antropogeniczny .....	94
6.2.3.	Znaczniki geochemiczne .....	98
6.2.4.	Koncepcja gradientu i bariery geochemicznej .....	98
6.2.5.	pH a rozpuszczalność .....	100
6.2.6.	Potencjał oksydacyjno-redukcyjny .....	107
6.2.7.	Przewodnictwo elektrolityczne właściwe .....	111
6.2.8.	Sucha pozostałość .....	111
6.2.9.	Temperatura .....	112
6.2.10.	Rozpuszczony tlen .....	112
6.2.11.	Zasadowość i kwasowość .....	113
6.2.12.	Twardość .....	114
6.2.13.	Roztwory .....	114
6.2.14.	Koloidy .....	116
6.2.15.	Naturalne przemiany promieniotwórcze .....	123
6.3.	Klasyfikacje pierwiastków .....	124
<b>7.</b>	<b>Środowiska i procesy geochemiczne w litosferze .....</b>	<b>128</b>
7.1.	Uwagi wstępne .....	128
7.2.	Procesy magmowe i pomagmowe .....	128
7.3.	Wietrzenie .....	131
7.3.1.	Podstawowe procesy wietrzenia .....	131
7.3.2.	Wietrzenie pirytu i innych minerałów siarczkowych ...	135
7.4.	Erozja, transport i sedymentacja .....	145
7.5.	Diageneza .....	147
7.6.	Metamorfizm .....	148
<b>8.</b>	<b>Znaczenie biosfery w obiegu pierwiastków .....</b>	<b>151</b>
8.1.	Podstawowe pojęcia stosowane w biogeochemii .....	151
8.2.	Terminologia i problematyka badań biogeochemicznych roślin ..	154
8.3.	Błaski i cienie interpretacji wyników badań biogeochemicznych roślin .....	162
<b>9.</b>	<b>Globalne cykle geochemiczne .....</b>	<b>165</b>
9.1.	Uwagi wstępne .....	165
9.2.	Obieg azotu .....	166
9.3.	Obieg fosforu .....	168
9.4.	Obieg siarki .....	170
9.5.	Obieg tlenu .....	174
9.6.	Obieg węgla .....	175
9.7.	Obieg wodoru .....	177
<b>10.</b>	<b>Charakterystyka geochemiczna i toksykologiczna wybranych pierwiastków .....</b>	<b>178</b>
10.1.	Uwagi wstępne .....	178
10.2.	Antymon .....	181
10.3.	Arsen .....	182
10.4.	Bar .....	184
10.5.	Beryl .....	185

10.6. Bizmut	186
10.7. Bor	187
10.8. Brom	187
10.9. Chlor	188
10.10. Chrom	189
10.11. Cyna	190
10.12. Cynk	191
10.13. Fluor	193
10.14. Glin	194
10.15. Jod	195
10.16. Kadm	196
10.17. Kobalt	197
10.18. Krzem	199
10.19. Lantanowce (pierwiastki ziem rzadkich)	200
10.20. Lit	204
10.21. Magnez	204
10.22. Mangan	205
10.23. Miedź	207
10.24. Molibden	209
10.25. Nikiel	210
10.26. Niob i Tantal	211
10.27. Ołów	212
10.28. Platyna	214
10.29. Potas	214
10.30. Rtęć	215
10.31. Rubid	218
10.32. Selen	218
10.33. Sód	220
10.34. Srebro	221
10.35. Stront	222
10.36. Tal	223
10.37. Tellur	223
10.38. Tor i uran	224
10.39. Tytan	226
10.40. Wanad	227
10.41. Wapń	228
10.42. Wolfram	229
10.43. Żelazo	230
10.44. Wykorzystanie pierwiastków śladowych w badaniach źródeł zanieczyszczeń	232
<b>11. Występowanie izotopów w środowisku przyrodniczym</b>	<b>235</b>
11.1. Podstawy geochemii izotopowej	235
11.2. Zarys geochemii wybranych izotopów w środowisku przyrodniczym	239
11.2.1. Siarka	239
11.2.2. Tlen	242
11.2.3. Węgiel	244

11.2.4. Wodór	247
11.2.5. Inne izotopy	248
11.3. Przykłady zastosowania izotopów w badaniach środowiskowych	251
11.3.1. Izotopy trwałe	251
11.3.2. Radioizotopy	261

## **Część II. Podstawowe trendy metodyczne i badawcze w geochemii środowiska**

<b>12. Zarys metodyki badań próbek środowiskowych</b>	267
12.1. Badania terenowe i pobieranie próbek	267
12.1.1. Uwagi wstępne	267
12.1.2. Znaczenie badań terenowych	270
12.1.3. Pobieranie próbek	274
12.2. Przygotowanie próbek	284
12.2.1. Uwagi wstępne	284
12.2.2. Preparatyka mineralogiczna i petrograficzna	285
12.2.3. Preparatyka chemiczna	285
12.2.4. Preparatyka izotopowa	290
12.3. Metody i techniki analityczne	291
12.3.1. Uwagi wstępne	291
12.3.2. Badania mineralogiczne i petrologiczne	291
12.3.3. Analizy chemiczne	298
<b>13. Statystyczna interpretacja wyników badań środowiska przyrodniczego</b>	321
13.1. Uwagi wstępne	321
13.2. Podstawowe pojęcia statystyki opisowej	322
13.3. Statystyka w geochemii	327
13.3.1. Korelacja i regresja	327
13.3.2. Zastosowanie analizy wariancji (ANOVA) w badaniach geochemicznych	328
<b>14. Teledetekcja – nowe wyzwanie dla geochemii środowiska</b>	331
14.1. Uwagi wstępne	331
14.2. Zastosowanie fotografii lotniczej i teledetekcji	332
14.3. Perspektywy rozwoju teledetekcji	335
<b>15. Zmiany globalne i ich wpływ na środowisko</b>	336
15.1. Uwagi wstępne	336
15.2. „Kwaśne opady” – rzeczywistość i mity	336
15.3. „Dziura ozonowa”	338
15.4. Efekt cieplarniany (szklarniowy)	340
<b>16. Rola geochemii środowiska w ochronie geosfery</b>	347
16.1. Uwagi wstępne	347
16.2. Geomonitoring	347
16.3. Litosfera	349

16.3.1. Wpływ wydobycia surowców mineralnych na środowisko przyrodnicze .....	349
16.3.2. Kwaśne wody kopalniane .....	352
16.4. Wody powierzchniowe i podziemne .....	355
16.4.1. Jakość i degradacja wód powierzchniowych i podziemnych .....	356
16.4.2. Uzdatnianie i racjonalne wykorzystanie wody .....	360
16.5. Osady wodne .....	361
16.6. Gleby .....	366
16.7. Obszary podmokłe i torfowiska .....	369
16.8. Powietrze .....	373
16.9. Gospodarka odpadami a ochrona środowiska .....	382
16.10. Inżynieria, technologia, zasoby naturalne, energia i środowisko .....	388
<b>17. Wykorzystanie roślin w prospekcji geochemicznej oraz rekultywacji i remediacji biologicznej .....</b>	<b>393</b>
17.1. Uwagi wstępne .....	393
17.2. Prospekcja geochemiczna .....	395
17.2.1. Wyznaczanie przebiegu uskoków .....	395
17.2.2. Poszukiwanie złóż i stref mineralizacji .....	395
17.3. Rekultywacja biologiczna obszarów pogórnich .....	397
17.4. Bioremediacja terenów skażonych .....	399
<b>18. Wykorzystanie organizmów żywych w wydobyciu metali – biogórnictwo i fitogórnictwo .....</b>	<b>403</b>
18.1. Uwagi wstępne .....	403
18.2. „Bakterijni górnicy” i ich wymagania ekologiczne .....	404
18.3. Biochemiczne podstawy biogórnictwa .....	405
18.4. Technologie biogórnictwa .....	405
18.5. Rośliny a wydobycie metali – fitogórnictwo .....	407
18.6. Przyszłość bio- i fitogórnictwa .....	408
<b>19. Biomonitoring środowiska przyrodniczego .....</b>	<b>410</b>
19.1. Uwagi wstępne .....	410
19.2. Porosty .....	412
19.2.1. Występowanie i ekologia porostów .....	412
19.2.2. Składniki szkodliwe a rozwój porostów .....	413
19.2.3. Zastosowanie porostów .....	421
19.3. Sosna .....	426
19.3.1. Uwagi wstępne .....	426
19.3.2. Występowanie i ekologia sosny zwyczajnej ( <i>Pinus sylvestris</i> ) .....	427
19.4. Mchy .....	435
<b>20. Rola geosfery w toksykologii środowiska .....</b>	<b>441</b>
20.1. Uwagi wstępne .....	441
20.2. Podział źródeł zanieczyszczeń .....	442



20.3.	Charakterystyka źródeł zanieczyszczeń	442
20.3.1.	Naturalne źródła zanieczyszczeń	443
20.3.2.	Geoantropogeniczne i antropogeniczne źródła zanieczyszczeń	447
20.4.	Ogólna charakterystyka geotoksyn	450
20.5.	Czynniki warunkujące obieg geochemiczny geotoksyn	450
<b>21.</b>	<b>Zanieczyszczenia środowiska przyrodniczego związkami organicznymi</b>	<b>453</b>
21.1.	Uwagi wstępne	453
21.2.	Źródła związków organicznych w środowisku przyrodniczym	453
21.3.	Procesy sorpcji i biodegradacji	456
21.4.	Przegląd ważniejszych grup toksycznych związków organicznych	458
21.5.	Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w środowisku przyrodniczym	465
21.6.	Przykłady badań zanieczyszczeń środowiska związkami organicznymi	470
<b>22.</b>	<b>Znaczenie geochemii medycznej w naukach o środowisku przyrodniczym</b>	<b>475</b>
22.1.	Cele geomedyliny i geochemii medycznej	475
22.2.	Podstawowe pojęcia z zakresu toksykologii	476
22.3.	Minerały stanowiące zagrożenie dla zdrowia i życia człowieka	479
22.4.	Czynniki fizykochemiczne decydujące o rozwoju chorób geochemicznych	482
22.5.	Środowisko geochemiczne a zasięg chorób	485
22.6.	Perspektywy rozwoju geochemii medycznej	490
<b>23.</b>	<b>Geochemia miast</b>	<b>492</b>
23.1.	Miasta jako specyficzne środowiska geochemiczne	492
23.2.	Rola źródeł zanieczyszczeń w kształtowaniu środowiska miejskiego	493
23.3.	Wpływ środowiska miejskiego na zdrowie mieszkańców	496
<b>24.</b>	<b>Geochemia sądowa</b>	<b>498</b>
24.1.	Historia i ważniejsze postacie w geologii sądowej	498
24.2.	Metody badań geochemii sądowej	499
24.3.	Geochemia sądowa w praktyce	501
	<b>Literatura</b>	<b>505</b>
	<b>Skorowidz terminów ogólnych</b>	<b>569</b>
	<b>Skorowidz minerałów</b>	<b>583</b>
	<b>Skorowidz nazw łacińskich gatunków i rodzajów roślin i zwierząt</b>	<b>591</b>
	<b>Ilustracje kolorowe</b>	<b>595</b>

# Wstęp

Niniejsza książka stanowi kontynuację wcześniejszych naszych dwóch podręczników pt. „Zarys geochemii środowiska” (2003) i „Podstawy geochemii środowiska” (2007). Od ostatniego wydania minęło 8 lat i dlatego wiele poruszanych w nim zagadnień należy przedstawić w nowym świetle oraz dokonać niezbędnych poprawek i uzupełnień. Potrzeba opracowania nowego podręcznika wyniknęła z dwóch przyczyn:

- z wyjątkowo dynamicznego rozwoju tej fascynującej dyscypliny nauk o Ziemi, jaką jest geochemia środowiska, jak również
- z braku książek z zakresu tytułowej tematyki na rynku wydawniczym w Polsce.

Znaczenie geochemii środowiska wynika z coraz większej obawy opinii publicznej przed zanieczyszczeniem czy wręcz skażeniem<sup>1</sup> różnych elementów abiotycznych (gleb, wód powierzchniowych i podziemnych, osadów wodnych, powietrza) i biotycznych (roślinności i zwierząt) a w konsekwencji – przed wpływem substancji zanieczyszczających i toksycznych na stan zdrowotny populacji ludzkiej. Inne poważne zagrożenia dla środowiska przyrodni-

---

<sup>1</sup> W literaturze naukowej i popularnej istnieje zamieszanie w zakresie stosowania terminów **zanieczyszczenie** (ang. *contamination*) i **skażenie** (ang. *pollution*). Niektórzy badacze reprezentują w tym względzie krańcowe podejście używając tylko jednego z wymienionych terminów, inni natomiast stosują je wymiennie. W krajach anglosaskich termin **pollution** odnosi się niekiedy wyłącznie do źródeł antropogenicznych (lub wywołanych działalnością gospodarczą człowieka), a **contamination** – odpowiednio do źródeł naturalnych (głównie geogenicznych). Autorzy niniejszej książki używają terminu **zanieczyszczenie** w znaczeniu ogólnym, jeśli poziom zawartości/stężenia jakiejś substancji nie stanowi zagrożenia dla stanu zdrowotnego (lub życia) roślin, zwierząt i człowieka, z uwzględnieniem obecnego stanu wiedzy.

czego wiążą się ze zmianami globalnymi wywołanymi lub modyfikowanymi przez działalność gospodarczą człowieka.

Geochemia środowiska włącza się też coraz bardziej w nurt badań nad ewentualnym wpływem zanieczyszczeń na zmiany klimatyczne w skali całego globu, a w szczególności na zwiększenie efektu cieplarnianego i „dziury” ozonowej. Mimo, że korzenie klasycznej geochemii tkwią w naukach o Ziemi, to jednak od lat sześćdziesiątych XX w. obserwuje się jej stopniową ewolucję w kierunku nauk biologicznych, rolniczych i medycznych *sensu lato*. Powstanie i rozwój geochemii i biogeochemii środowiska, geochemii organicznej, geotoksykologii oraz geochemii medycznej jest potwierdzeniem interdyscyplinarnego charakteru tej dziedziny wiedzy i potencjalnych możliwości jej rozwoju. Geochemia środowiska posługuje się metodami i technikami stosowanymi m.in. w naukach o Ziemi (głównie w klasycznej geochemii, mineralogii, petrologii, geologii złóż, hydrogeologii i geofizyki), także w chemii, fizyce, biologii i toksykologii. Stwarza to dla niej ogromne możliwości badawcze i interpretacyjne, przy jednocześnie bardziej holistycznym podejściu do wielu kluczowych zagadnień środowiska. Taki interdyscyplinarny zakres stanowi też impuls do rozwoju nowych hybrydowych metod i technik badawczych oraz kierunków badań.

Książka „Geochemia środowiska” składa się z dwóch części: ogólnej i szczegółowej. Pierwszą z nich otwiera rozdział, w którym omówiono w zarysie historię geochemii, geo- i ekoanalityki z podkreśleniem ich ścisłego związku z naukami mineralogicznymi. W następnym rozdziale przedstawiono pozycję geochemii środowiska na tle nauk przyrodniczych oraz jej cele i zadania. Aby w pełni zrozumieć obieg pierwiastków chemicznych w środowisku przyrodniczym, niezbędna jest znajomość fizykochemicznych podstaw klasycznej geochemii, mineralogii i petrologii. Tym dziedzinom nauk o Ziemi poświęcono dalsze rozdziały książki. Opisano w nich m.in. strefy kuli ziemskiej wraz z ich charakterystyką geochemiczną oraz podstawowe zagadnienia związane z tektoniką płyt, z tą najbardziej rewolucyjną teorią ewolucji skorupy ziemskiej, która w ostatnich kilku dekadach wywarła ogromny wpływ na rozwój nauk przyrodniczych. Tłumaczy ona mechanizm wielu procesów geologicznych: tektonicznych, magmowych, złożowych, „wędrówki” kontynentów itp., a w szczególności wielkoskalowego obiegu pierwiastków, zmian klimatycznych i katastrof naturalnych. Implikacje teorii tektoniki płyt sięgają jednak dalej i obejmują różne zagadnienia związane np. z rozwojem życia w ekstremalnych warunkach fizykochemicznych panujących na Ziemi i w układzie słonecznym, z ewolucją i przetrwaniem gatunków na Ziemi, biotechnologią itp. W kolejnych rozdziałach omówiono najważniejsze czynniki

geochemiczne i klasyfikacje pierwiastków oraz środowiska i procesy geochemiczne w litosferze. Przedstawiono również problematykę związaną z rolą biosfery w procesach geochemicznych i obiegu pierwiastków. Omówiono cykle globalne azotu, fosforu, siarki, tlenu, węgla i wodoru oraz podano charakterystykę geochemiczną i toksykologiczną wybranych pierwiastków. Odrębny rozdział poświęcono izotopom znajdującym coraz częstsze zastosowanie w badaniach stanu środowiska przyrodniczego, określaniu lokalizacji źródeł zanieczyszczeń oraz „śledzeniu” ścieżek przemieszczania się substancji potencjalnie toksycznych.

W części szczegółowej omówiono w zarysie metody badań terenowych i laboratoryjnych oraz statystycznej obróbki uzyskanych wyników. Przedstawiono też najważniejsze zagadnienia związane z zastosowaniem metod geofizycznych, zwłaszcza teledetekcji, w rozwiązywaniu różnych zagadnień z zakresu geochemii środowiska. Kolejno omówiono wpływ zmian globalnych na powstawanie „kwaśnych opadów”, „dziury” ozonowej i efektu cieplarnianego, a następnie ich oddziaływanie na środowisko przyrodnicze w aspekcie procesów geochemicznych. Osobny rozdział poświęcono roli geochemii środowiska w badaniach i ochronie podstawowych składników przyrody nieożywionej, w tym litosfery, wód powierzchniowych i podziemnych, osadów wodnych, gleb, obszarów podmokłych i torfowisk oraz powietrza. W rozdziale tym omówiono też wpływ na środowisko przyrodnicze kwaśnych wód pochodzących z eksploatowanych i nieeksploatowanych złóż rud siarczków metali i węgla oraz pirytonośnych formacji skalnych. Poruszono w nim również podstawowe zagadnienia związane z gospodarką odpadami, inżynierią, technologią, zasobami naturalnymi i energią w relacji do środowiska przyrodniczego.

Interaktywne związki między elementami biotycznymi i abiotycznymi oraz znaczenie biowskaźników omówiono w dwóch rozdziałach poświęconych:

- wykorzystaniu roślin na dwóch biegunach działalności człowieka – w poszukiwaniu (prospekcji) złóż surowców mineralnych lub rekultywacji i bioremediacji obszarów pogórnich i skażonych oraz
- biomonitoringowi stanu środowiska ze szczególnym uwzględnieniem porostów, sosny zwyczajnej i mchów.

W tym bloku zagadnień umieszczono też rozdział poświęcony biogórnictwu i fitogórnictwu, w których wykorzystuje się mikroorganizmy i rośliny do otrzymywania metali z odpadów pogórnich lub wód kopalnianych. W końcowych rozdziałach przedstawiono podstawową problematykę z zakresu geotoksykologii, geochemii organicznej, geochemii medycznej, geochemii miast i geochemii sądowej.

Niniejsza książka jest przeznaczona dla specjalistów, doktorantów i studentów zainteresowanych naukami o Ziemi, o środowisku przyrodniczym, naukami biologicznymi, chemicznymi, rolniczymi i medycznymi. Powstała ona m.in. w wyniku realizacji polskich i amerykańskich projektów badawczych z zakresu geochemii środowiska. Autorzy książki prezentują „geologiczny” punkt widzenia omawianych zagadnień i uwypuklają rolę elementów abiotycznych w interakcjach geochemicznych zachodzących w biosferze. Należy więc mieć nadzieję, że ten nieco odmienny od tradycyjnego, sposób przedstawienia przedmiotowego zagadnienia będzie impulsem do dalszych przemyśleń, studiów i badań.

Każda publikacja jest dziełem nie tylko samych autorów, lecz również osób bliskich, wspierających dobrą radą oraz intelektualną lub materialną pomocą. Autorzy składają szczególne podziękowania prawdziwym przyjaciołom: dr. Paulowi J. Lamothe, dr. Jamesowi G. Crockowi i dr. Larry’emu P. Goughowi, emerytowanym pracownikom Służby Geologicznej Stanów Zjednoczonych (US Geological Survey), prof. dr. hab. Stanisławowi Hałasowi z Zakładu Spektrometrii Mas Instytutu Fizyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie oraz dr. inż. Piotrowi Paślowskiemu i mgr Krystynie Hnatyszak emerytowanym pracownikom Centralnego Laboratorium Chemicznego Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego w Warszawie za wieloletnią współpracę naukową i wymianę informacji, które zaowocowały powstaniem tej książki. Autorzy dziękują też prof. dr. hab. Alinie Kabacie-Pendias z Instytutu Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach, prof. dr. hab. inż. Andrzejowi Maneckiemu z Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz prof. dr. hab. Mariuszowi O. Jędryskowi i prof. dr. hab. Michałowi Sachanbińskiemu z Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego we Wrocławiu, których publikacje stanowiły dla nich inspirację naukową, za twórcze dyskusje oraz cenne i krytyczne uwagi, które wpłynęły na poprawę poziomu merytorycznego niniejszego dzieła.

Część I

# Interdyscyplinarne podstawy geochemii środowiska

Antarktyczna, Płyta Euroazjatycka, Płyta Afrykańska, Płyta Indo-Australijska, Płyta Nazca, Płyta Pacyficzna, Płyta Północnoamerykańska, Płyta Południowoamerykańska, Płyta Arabska, Płyta Filipińska, Płyta Juan de Fuca, Płyta Karaibska, Płyta Kokosowa i Płyta Scotia (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Rozkład płyt tektonicznych na powierzchni kuli ziemskiej (Kious, Tilling, 1995, uzupełnione przez autorów)

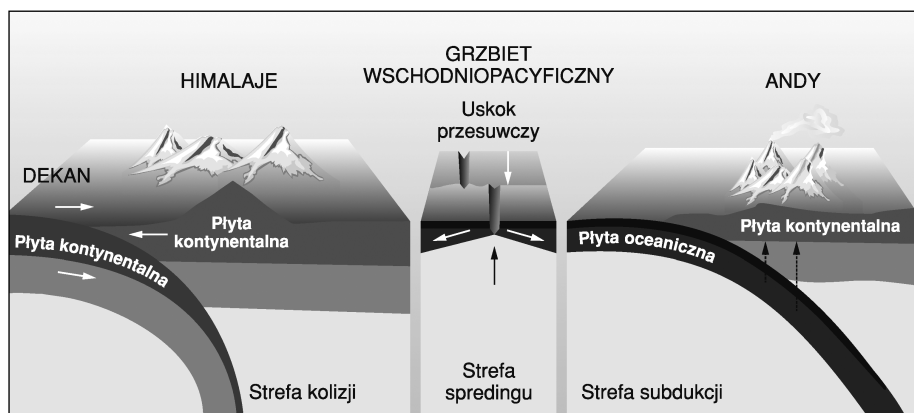
Wymienione płyty przesuwają się bardzo powoli (z prędkością od 1 do 10 cm rocznie) po astenosferze, czyli gęstej półplastycznej zewnętrznej warstwie płaszcza Ziemi. Ciepło powstałe w jądrze i dolnym płaszczu wędruje ku powierzchni Ziemi, tworząc prądy konwekcyjne. Inicjują one ruch („wędrowkę”) wyżej leżących płyt. W miejscach, gdzie prądy się rozchodzą powstają strefy spredingu (akrecji), natomiast gdzie schodzą – strefy subdukcji (*vide* rozdz. 4.2). W strefach spredingu dochodzi do wypływów magmy, w wyniku których litosfera podnosi i przesuwa się na zewnątrz od grzbietu, co wymusza przemieszczanie płyt oceanicznych w kierunku stref subdukcji, gdzie następuje ich pograżanie w astenosferze (Stanley, 2002).

Przypuszcza się, że płyty utworzyły się już w najwcześniejszych etapach historii Ziemi, tj. ok. 4,6 mld lat temu. W dziejach Ziemi wielokrotnie dochodziło do tworzenia się i rozpadu superkontynentów. I tak około 200 milionów

lat temu istniał jeden superkontynent Pangea, który początkowo rozpadł się wzdłuż stref ryftowych na dwie podstawowe masy lądowe Laurazję (na północy) i Gondwanę (na południu), a następnie w wyniku ich dalszej dezintegracji na obecne płyty-kontynenty.

## 4.2. Granice płyt tektonicznych

Aktywność płyt prowadzi do powstania czterech rodzajów granic (rys. 4.7):



Rys. 4.7. Główne typy granic płyt tektonicznych (Kious, Tilling, 1995, uzupełnione przez autorów)

1. **Granice konstrukcyjne** lub **rozbieżne** (ang. *constructive margins, divergent boundaries*) powstają między dwiema rozchodzącymi się płytami. Są to miejsca, gdzie zaczyna tworzyć się skorupa ziemska (strefy sprejdu – ang. *sea-floor spreading centers*). Każda strefa sprejdu składa się z śródoceanicznego grzbietu górskiego (ang. *mid-ocean ridge*) i centralnej doliny ryftowej (ang. *central rift-valley*). Przykładami są: Wyniesienie Wschodniopacyficzne, Grzbiet Juan de Fuca i Wyniesienie Środkowoatlantyckie. Wszystkie wymienione struktury są przykryte oceanami. Jedynymi wyjątkami są Islandia i Wyspa Wniebowstąpienia, gdzie grzbiet górski (wraz z czynnymi wulkanami) odsłania się na powierzchni oceanu. Struktura ryftowa jest miejscem, gdzie wydobywa się lava bazaltowa o temperaturze powyżej 1000°C i które wykazuje aktywność hydrotermalną (ang. *sea-floor hot springs, smokers*). Rocznie zwiększa się grubość skorupy oceanicznej od 2,5 cm (Grzbiet Arktyki) do 25 cm (Wyniesienie Wschodniopacyficzne). Kolejne iniekcje magmy powodują powstanie no-



wych grzbietów i centralnych dolin ryftowych oraz rozchodzenie się starszych struktur na zewnątrz. Rocznie przybywa ok. 20 km<sup>3</sup> skorupy oceanicznej. Śródoceaniczne grzbiety górskie tworzą jeden gigantyczny globalny system (ang. *global mid-ocean ridge*) o długości ponad 75 000 km i wysokości ok. 4500 m. Jest to najwyraźniej zaznaczona struktura morfologiczna Ziemi (Simkin i in., 1994; Kious, Tilling, 1995). Odmianą wymienionych struktur oceanicznych są lądowe systemy ryftowe (np. Afryki Środkowej, Morza Czerwonego i Zatoki Adenu), gdzie dochodzi do rozdzielenia się dwóch brzegów rowu, wywołanego iniekcją magmy z astenosfery. Konsekwencją tych procesów będzie powstanie nowego oceanu oraz położonej na wschód podłużnej wyspy rogu Afryki. Przykładem wcześniejszego oderwania się od Afryki dwóch mas lądowych są Madagaskar i Dekan.

**Granice destrukcyjne lub zbieżne** (ang. *destructive margins, convergent boundaries, subduction zones*) są to rowy oceaniczne o głębokości ok. 8–11 km, w których cięższa „bazaltowa” płyta oceaniczna podsuwa się bardzo wolno (ang. *slow „collision”*) pod lżejszą „granitową” płytę kontynentalną. Klasycznym przykładem jest oceaniczna Płyta Nazca zagłębiająca się pod Płytę Ameryki Południowej. Proces ten doprowadził do powstania Rowu Chilijsko-Peruwiańskiego, przy czym czoło płyty kontynentalnej uległo wypiętrzeniu dając łańcuch górski Andów. Ruchom mas skalnych ku górze towarzyszą silne trzęsienia ziemi. W strefach subdukcji dochodzi do stopienia lżejszego, „zeskrobanego” z płyty oceanicznej, materiału skalnego (głównie osadu morskiego). Tworzy on gigantyczne „bąble” kwaśnej magmy, wędrujące strefami zluźnień ku górze górotworu. W przypadku zastygnięcia w głębszych partiach dają one intruzje magmowe typu batolitów (np. słynne kopuły granitowe – *granite domes* w Parku Narodowym Yosemite w Kalifornijskich Górach Sierra Nevada), a przebijając powierzchnię wywołują gwałtowne erupcje wulkaniczne (np. wulkany ryolitowe i dacytowe<sup>1</sup> Gór Kaskadowych w NW części USA) (zob. s. 601, rys. 4.8, 4.9). Strefy subdukcji powstają również w wyniku podsuwania się jednej płyty oceanicznej pod drugą, np. szybko przesuwaną się Płytę Pacyfiku pod znacznie wolniejszą Płytę Filipińską. Elementami strukturalnym towarzyszącymi tym strefom są rowy oceaniczne (np. Rów Mariański) oraz równoległe do nich

<sup>1</sup> Dacyty i ryolity należą do grupy kwaśnych skał magmowych wylewnych (z kwarcem jako minerałem wskaźnikowym). W ryolitach skalenie alkaliczne (potasowe, rzadziej sodowe) dominują zdecydowanie nad plagioklazami (skaleniami sodowo-wapniowymi), natomiast w dacytach występują tylko plagioklasy. Magmy tych skał są bardzo gęste i łatwo krzepiwe, prowadząc często do zaczopowania komina wulkanicznego, a w następstwie zwiększenia ciśnienia gazów i pary wodnej – do gwałtownej eksplozji i rozerwania górnej części stożka wulkanicznego.

wulkaniczne łuki wysp (ang. *island arcs*) (np. Archipelag Wysp Mariańskich). W przypadku kolizji dwóch płyt kontynentalnych nie dochodzi do subdukcji, lecz wypiętrzenia występujących między nimi osadów. W ten sposób w wyniku nacisku Płyty Indo-Australijskiej na Płytę Euroazjatycką, które rozpoczęło się ok. 40–50 milionów lat temu, doszło do powstania najpotężniejszych systemów górskich na lądzie – Himalajów (o wysokości do 8854 m n.p.m.) i Karakorum oraz jednoczesnego wypiętrzenia Płaskowyżu Tybetu (do ok. 4600 m n.p.m.).

2. **Granice konserwatywne** (ang. *conservative margins, transform boundaries*) występują wzdłuż przesuwających się obok siebie płyt. Bilans jest tu zerowy – litosfery ani nie przybywa, ani nie ubywa. Klasycznym przykładem takich stref są uskoki przesuwcze (ang. *strike-slip faults*). Należy do nich słynny uskoki San Andreas w Kalifornii o długości ok. 1300 km, wzdłuż którego przesuwa się dwie płyty – Ameryki Północnej (w kierunku południowo-wschodnim) i Pacyfiku (ku północnemu zachodowi) z szybkością ok. 5 cm rocznie. Proces ten trwa już 10 mln lat. Wymieniony uskoki łączy jednocześnie Wyniesienie Wschodniopacyficzne i Południowy Grzbiet Gorda–Juan de Fuca–Explorer. Oceaniczne uskoki przesuwcze osiągają długość kilku tysięcy kilometrów, tworząc miejscami kaniony o głębokości do 8 km.
3. **Strefy graniczne płyt** (ang. *plate boundary zones*) są niezbyt wyraźne, a ich charakter nie jest całkowicie jasny lub czytelny. Jedną z takich stref jest region alpejsko-śródziemnomorski, położony między Płytami Euroazjatycką i Afrykańską. Występują tu dwie duże płyty i kilka mikropłyt, co jest powodem istnienia bardzo skomplikowanych struktur geologicznych oraz układów trzęsień ziemi i działalności wulkanicznej.

### 4.3. Znaczenie tektoniki płyt w naukach przyrodniczych

Tektonika płyt tłumaczy rozmieszczenie wulkanów oraz stref działalności postwulkaniczno-hydrotermalnej i trzęsień ziemi (Rona, 1986; Kious, Tilling, 1995). Prawie 3/4 rejestrowanych trzęsień ziemi i 2/3 czynnych wulkanów występuje w strefach subdukcji, otaczających Ocean Spokojny („Pierścień Ognia” – ang. „*Ring of Fire*”). W przeciwieństwie do stref spredingu, w których trzęsienia ziemi są niewielkie (rozsuwanie się cienkiej skorupy oceanicznej powoduje szybkie rozładowanie naprężeń), strefy subdukcji charakteryzują się najsilniejszymi wstrząsami, a ich epicentra są zlokalizowane na głębokości co najmniej do 300 km. W tych ostatnich występują wulkany

złożone (stratowulkany) o dużej sile eksplozji. Przykładem może być wulkan Pinatubo, położony na zachodnim skraju Płyty Filipińskiej, którego erupcja w 1991 r. należała do największych w XX w. Potoki popiołu i błota doprowadziły do ogromnej dewastacji terenu w jego rejonie. Silne trzęsienia ziemi występują też w miejscu kontynentalnych uskoków przesuwczych. W strefach kolizji płyt kontynentalnych, jak również oceanicznych uskoków przesuwczych, trzęsienia ziemi są na ogół słabe, a ich epicentra są zlokalizowane na niewielkich głębokościach. W wymienionych strefach nie rejestruje się też intensywnej działalności wulkanicznej.

Wiele wulkanów występuje również nad „gorącymi plamami” w centralnych partiach płyt oceanicznych (wulkany tarczowe) oraz kontynentalnych (wulkany złożone) (Harris, Tuttle, 1990). Wstępujący strumień ciepła częściowo nadtapia nasuwającą się płytę, co prowadzi do powstania – zależnie od składu litologiczno-petrograficznego skał podłoża – magmy bazaltowej, dacytowej lub ryolitowej<sup>2</sup>. Magma wypychana ku górze tworzy wulkany. Do klasycznych przykładów należy tu Hawaiian Ridge-Emperor Seamount Chain z największymi czynnymi wulkanami na świecie: Kilauea i Mauna Loa oraz położonym na południowy wschód najmłodszym podwodnym wulkanem Loihi.

Podmorskie trzęsienia ziemi oraz niekiedy wybuchy wulkanów są źródłem gigantycznych fal, zwanych tsunami. Są to serie fal przebiegające przez ocean z szybkością ponad 800 km/h i spiętrzające się w strefach linii brzegowej na wysokość kilkudziesięciu metrów. W wyniku erupcji wulkanu Krakatau (Krakatoa) w 1883 r., fale tsunami zmyły 165 wiosek na wybrzeżach Jawy i Sumatry, zabijając ok. 36 000 ludzi. Do najtragiczniejszego podmorskiego trzęsienia ziemi doszło jednak w 2004 r. w wyniku gwałtownego podniesienia się Płyty Filipińskiej o 20 m przez podsuwającą się pod nią Płytę Indo-Australijską. Gigantyczna fala o wysokości do ponad 30 m przetoczyła się wzdłuż wybrzeży północnego Oceanu Indyjskiego, zabijając ok. 300 tys. osób.

Skorupa oceaniczna jest również „taśmą” rejestrującą historię zmian pola magnetycznego Ziemi. Mapy paleomagnetyczne przedstawiają pasy w przybliżeniu równoległe do stref spredingu o przeciwnej orientacji biegunowej kryształów magnetytu ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ ).

Nie mniejsze reperkusje wywarła teoria tektoniki płyt na interpretację zmian paleoklimatycznych i ewolucji gatunków. Poszczególne kontynenty łączyły się i rozchodziły, przesuwając się jednocześnie przez różne strefy klimatyczne. Przykładami efektu tego procesu są: pokłady węgla kamiennego

<sup>2</sup> Są to skały magmowe wylewne. Bazalty należą do grupy skał zasadowych wylewnych (z plagioklazami zasadowymi jako minerałami wskaźnikowymi), natomiast dacyty i ryolity – do grupy skał kwaśnych.

z paprociami rodzaju *Glossopteris* (pozostałości po karbońskich bagiennych lasach tropikalnych), występujące obecnie na Antarktydzie, gliny polodowcowe (tillity) z Afryki południowej (Vaal River Valley) lub odrębne linie rozwoju gatunków roślin i zwierząt na izolowanych kontynentach lub oderwanych od nich wyspach (mikropłytach). Skamieniałości *Glossopteris*, znajdujące w Ameryce Południowej, Afryce, Dekanie, Australii i Antarktydzie, świadczą o istnieniu w triasie (ok. 235 mln lat temu) superkontynentu Gondwany. Przez cały ten okres skorupa ziemska rodziła się i umierała, przechodząc przez wiele cykli rozwojowych.

Obecnie przyjmuje się, że tektonika płyt jest czynnikiem niezbędnym do rozwoju życia na planetach (Marion i in. 2003). Okresowa przebudowa litosfery umożliwia uzupełnienie zasobów naturalnych biosfery – puli biopierwiastków (Schlesinger, 2005).