

# ROZDZIAŁ 1

## CZYTAJĄC W SKAŁACH

W połowie siedemnastego wieku James Ussher, powszechnie poważany uczyony i biskup Kościoła anglikańskiego w Irlandii i Anglii, wyliczył, że Ziemia została stworzona w roku 4004 p.n.e. Doszedł do tego wniosku w wyniku dokładnych studiów i dosłownej interpretacji Biblii. Zgodnie z duchem badań owego czasu, współcześni mu uczeni - nie próbując wymyślić innych metod określenia wieku Ziemi - sprawdzili rachunki Usshera. Rok powstania jest wyliczony prawidłowo, oświadczyli, lecz można podać dokładniejszą datę: Ziemia została stworzona o godzinie 9 rano, 23 października 4004 roku przed naszą erą!

Dziś wydziały geologii niektórych uniwersytetów, starając się w sposób żartobliwy uczcić Usshera, świętują urodziny Ziemi 23 października. W rzeczywistości jednak Ziemia jest prawie milion razy starsza, niż to obliczył Wielebny. Jej prawdziwy wiek wynosi 4,5 miliarda lat, choć trzeba było ponad stu lat od opublikowania pracy Usshera, by geolodzy zaczęli zdawać sobie sprawę z rzeczywistego ogromu czasu geologicznego.

Tak więc nasza planeta jest niewiarygodnie stara wedle ludzkich standardów: 4,5 miliarda lat to odcinek czasu, który nie ma żadnego odniesienia do doświadczeń człowieka. Skala czasu geologicznego jest tak niezmierna, że tylko poprzez analogię możemy zrozumieć pozornie niezmierny okres, jaki upłynął pomiędzy powstaniem Ziemi i pojawieniem się ludzi. Jedną z ta-

kich analogii może być historia Ziemi przedstawiona jako trzygodzinny film. My -jako gatunek, nie ty czyja osobiscie - pojawilibyśmy się mniej więcej w ostatniej jego sekundzie. Książka ta, podobnie jak trzygodzinny film, jest bardzo skróconą podróżą przez tę historię, poczynając od powstania Układu Słonecznego aż do dzisiaj. Jest ona uporządkowana chronologicznie; dygresje są okazjonalne, pozwalają one przedyskutować zagadnienia ważne dla zrozumienia tej historii. Czytelnika należy jednak uprzedzić, że dotyczy ona tylko niektórych najważniejszych zagadnień. Można by łatwo strawić niejedno ludzkie życie, zanim opanowałoby się wszystkie szczegóły fascynującej przeszłości Ziemi.

Dla większości z nas naturalny krajobraz jest w jakimś stopniu stały. Z wyjątkiem takich klęsk, jak wybuchy wulkanów lub wielkie trzęsienia ziemi, panorama geologiczna w zasadzie nie zmienia się zauważalnie w ciągu życia człowieka. Ziemia w swej historii przeszła jednak niezwykle przeobrażenia. W ciągu miliardów lat swego istnienia planeta nasza przeżywała globalne katastrofy na skalę nieporównywalną z ludzkim doświadczeniem, była świadkiem powstania i wyginięcia niezliczonych gatunków, które nie zdobią już Ziemi, oraz tworzenia się i znikania całych basenów oceanicznych i łańcuchów górskich. Skąd o tym wiemy? Naszą wiedza pochodzi częściowo z eksperymentów w laboratoriach i symulacji matematycznej procesów geologicznych lub jest nawet wynikiem inteligentnej spekulacji, lecz w większości pochodzi ze skał. Skały są zapisem ziemskiej historii i zawierają wskazówki na temat przeszłości planety. Odczytywanie ich nie zawsze jest łatwe i choć wiele się już dowiedzieliśmy, znacznie więcej pozostaje do odkrycia. Książka ta powstała z myślą o pobudzeniu apetytu nawiedze, ponieważ niewiele jest rzeczy bardziej satysfakcjonujących niż zrozumienie pochodzenia te-(*Sp.* co nas w świecie fizycznym otacza, i być może własnego w nim miejsca.

Jezyk nauk o Ziemi, podobnie jak jezyk innych dyscyplin, charakteryzuje się swoistym słownictwem. Częściowo dlatego, że skały, minerały, skamieniałości i formy krajobrazu, aby o nich można było rozmawiać w mądry sposób, wymagają nazw. Wynika to również z bezmiaru czasu geologicznego: geolodzy podzielili historię Ziemi na jednostki czasu i nadali im nazwy brzmiące obco dla większości niegeologów. Ich źródłem są zwykle pewne rejony geograficzne, gdzie skały określonego przedziału czasu są szczególnie dobrze rozwinięte. Staralem się w tej książce ograniczyć terminologię geologiczną do minimum, lecz nieznane słowa muszą powracać, niektóre często. Na końcu książki umieściłem więc słowniczek. Rycina 1. 1 powinna również dopomóc w zrozumieniu geologicznej skali czasu, która jest zmartwieniem studentów pierwszych lat geologii; większość z nich jednak ulega i opanowuje nazwy er, okresów, a nawet krótszych jednostek, rozumiejąc, że pewnych rzeczy po prostu trzeba się nauczyć, tak jak nazw miesięcy lub danych ulubionej drużyny baseballowej. Wkrótce ta wiedza staje się drugą naturą.

Granice między erami, okresami i epokami geologicznej skali czasu zostały pierwotnie wyznaczone głównie na podstawie

skamieniałości, które są częścią zapisu skalnego. W całej historii Ziemi gatunki i rodziny powstawały, dominowały w jakimś czasie, aby potem zniknąć. Lecz niekiedy, z powodów nie do końca zrozumiałych, następowała szybka, i na dużą skalę, zagłada znacznej części roślin i zwierząt. Zwykle po tych kryzysach następował szybki rozwój nowych i czasami zupełnie innych gatunków. Takie gwałtowne zmiany w zespołach roślinnych i zwierzęcych znajdują odbicie w zapisie kopalnym. Dopiero od niedawna geolodzy badają owe masowe wymierania w kategoriach okresowych katastrof, takich jak zderzenia z Ziemią komet lub planetoid czy dramatyczne zmiany światowego klimatu. Choć interpretacje mogą być różne, niemniej zapis tych zdarzeń był zawsze obecny w skałach i dostępny każdemu. Dostarczyły one badaczom materiału do logicznego podziału historii geologicznej. Granice zostały ustalone w miejscach drastycznych zmian w naturze zapisu kopalnego. Prosta wersja skali geologicznej jest pokazana na rycinie 1.1. Będziemy do niej często wracali podczas czytania tej książki.

Powiązania między skalą czasu i skałami na pierwszy rzut oka mogą nie być oczywiste. Staną się jednak jaśniejsze, kiedy rozważymy sposób powstawania skał osadowych, które przede wszystkim posłużyły do wyznaczenia geologicznej skali czasu. Osady gromadzą się na powierzchni Ziemi ziarno po ziarnie, czasami atom po atomie, zwykle w wodzie. Są wynikiem erozji i wietrzenia na lądzie, a składniki znoszone są do jezior lub morz przez strumienie. Większość osadów jest początkowo nie skonsolidowana, tak jak muł czy piasek, aby później w wyniku różnorodnych procesów stwardnieć w zwięzłą skałę. Osady zawierają i zachowują w sobie muszle, szkielety, liście, pióra i inne części roślin i zwierząt, dostarczając zapisu ewolucji biologicznej. Jedno odsłonięcie tych skał może obejmować tysiące lub nawet miliony lat nieprzerwanej sedymentacji - i zawsze najstarsza warstwa znajduje się u podstawy, a najmłodsza na górze. Znaczna część skali czasu pokazana na rycinie 1.1 została skonstruowana na podstawie skamieniałości, w wyniku złożenia razem nakładających się kawałków tego zapisu z różnych części świata. Trzeba jednak zdać sobie sprawę, że zarówno sedymentacja, jak i zachowanie się skamieniałości są procesami kapryśnymi. Co więcej, kiedy obniża się poziom morza lub osady są wypiętrzane, erozja wymazuje część zapisu. W rezultacie powstaje wiele luk. Dla Darwina, który musiał wytłumaczyć, dlaczego zapis kopalny nie pokazuje każdego szczegółu ewolucji, stanowiło to poważny problem. Cały rozdział *O powstawaniu gatunków* jest poświęcony temu zagadnieniu i nosi tytuł „O niedostateczności danych geologicznych”.

Skały osadowe, choć dostarczają najlepszego ciągłego zapisu historycznego, nie są jedynym materiałem w pracy geologa. Skały magmowe i metamorficzne także zawierają informacje o swoim pochodzeniu i historii, lecz innego typu. W przeciwieństwie do osadów, skały magmowe powstają we wnętrzu Ziemi w wyniku przetapiania i krystalizują do swego obecnego stanu, kiedy stopiona magma - termin używany przez geologów dla ciekłej skały

- ochładza się na powierzchni Ziemi, lub blisko niej. Znanymi przykładami są różowe granity ozdabiające fasady banków i innych budynków lub ciemne bazalty powstałe z law wylewających się z wulkanu Kilauea na Hawajach. Skład chemiczny takich skał zawiera wskazówki dotyczące środowiska geologicznego,

w jakim powstawały. Choć nie musi się to wydawać odkrywczym w wypadku młodych skał - wiemy przecież, że Hawaje są wulkanami pośrodku Pacyfiku bez badania składu chemicznego lawy - jest to decydujące dla zrozumienia starych skał, ponieważ pozwala zrekonstruować fizyczny świat przeszłości.

Skały metamorficzne są jeszcze inne. Są to skały osadowe lub magmowe silnie zmienione, zwykle w wyniku głębokiego pogrzebienia i ogrzania, które przekształciło ich skład mineralny. Ich istnienie oznacza zmienność Ziemi w długich okresach czasu geologicznego. Skały metamorficzne, po których chodzimy lub na które się wspinamy bez chwili zastanowienia, mogły zacząć swoje życie w odległej przeszłości jako zwiędziona, gromadząca się warstwa po warstwie w morzu wzdłuż krawędzi dawnego kontynentu. Minerale metamorficzne dziś w nich zawarte dostarczają niemego świadectwa innego, mniej pasywnego etapu ich historii: pogrzebienia, być może na głębokość 20 i więcej kilometrów, i silnego ogrzania. Zdarza się to często w czasie epizodów tworzenia się gór i wiemy, że takie skały metamorficzne występują dzisiaj głęboko we wnętrzu Andów i Himalajów. Lecz czy możemy spodziewać się takich skał na powierzchni Ziemi? Odpowiedź przynosi wiedza o tym, że nawet najbardziej spektakularne łańcuchy górskie są efemeryczne według standardów czasu geologicznego. Stają się ofiarami ciągłej erozji i wynoszenia i stopniowo ulegają zniszczeniu. W wyniku tego procesu nasze głęboko pogrzebane osady, teraz już skały metamorficzne, zostają w końcu ponownie odsłonięte na powierzchni. Cykle takie należą do naturalnego funkcjonowania Ziemi i choć występują w skali czasu znacznie przekraczającej możliwość bezpośredniej obserwacji przez człowieka, ich zapis obecny jest w skałach.

Do niedawna geolodzy nie rozumieli do końca, dlaczego w Japonii występują wulkany lub dlaczego Ural powstał w środkowej Rosji. Teoria tektoniki płyt zmieniła tę sytuację. Nagle geologia, podobnie jak większość dyscyplin, znalazła podstawę, która umożliwiała połączenie w całość wielu pozornie różnych obserwacji. W tej perspektywie powierzchnia Ziemi składa się z serii wielkich, sztywnych płyt grubości mniej więcej 100 kilometrów,

poruszających się względem siebie. W niektórych miejscach płyty się rozsuwają, rosnąc dzięki dodawaniu nowego materiału przy rozbiegających się krawędziach. W innych z kolei zderzają się i wtedy jedna z nich zwykle zanurza się pod drugą, do wnętrza Ziemi. W jeszcze innych miejscach gigantyczne płyty ślizgają się wzdłuż siebie, jak się to dzieje na uskoku San Andreas w Kalifornii, krusząc skorupę ziemską. Większość wydarzeń geo-

logicznych następuje na granicach płyt. Jeśli zaznaczymy na mapie świata miejsca wszystkich trzęsień ziemi, jakie wydarzyły się w ciągu ostatniej dekady, pokryją się wyraźnie z granicami płyt tektonicznych. Aktywność wulkaniczna na świecie również w większości występuje wzdłuż tych granic.

Mapa świata przedstawiająca tektonikę płyt jest gigantyczną układanką, której każdy kawałek to płyta, tyle tylko, że kawałki te się poruszają i powoli, lecz zdecydowanie, a ich kształty ulegają zmianie. Gdyby wykonać taką samą mapę za 50 milionów lat, Los Angeles leżałoby na wyspie gdzieś naprzeciw środkowej Kolumbii Brytyjskiej, a Australia ścierałaby się z wyspami Indonezji. Nowy Jork położony byłby dalej od Londynu niż dzisiaj, za to bliżej Tokio, ponieważ Atlantyk rozszerzyłby się kosztem Pacyfiku.

Wbrew niektórym potocznym wyobrażeniom płyty nie poruszają się na ciekłym wnętrzu, tak jak łód pływający po wodzie. Ruch wynika raczej z rodzaju plastycznego przepływu u ich podstawy. Wnętrze Ziemi jest stałe, ale równocześnie gorące, może więc ulegać deformacjom i przepływowi w wyniku powolnych ruchów w długich okresach, podobnie jak płyną lodowce. Płyty powierzchniowe - przeciwnie - są zimne i dość sztywne. Właściwości fizyczne rozdzielają je od niżej leżącego, podlegającego konwekcji wnętrza Ziemi.

Konwekcja we wnętrzu jest w rzeczywistości głównym mechanizmem utraty ciepła przez Ziemię. Skały budujące płaszcz ziemski (ryc. 1.2) są tak dobrym izolatorem, że potrzeba by wielu miliardów lat, aby ciepło z wnętrza przedostało się na powierzchnię wyłącznie w procesie przewodzenia. Jednakże konwekcja w płaszczu przesuwa skały w kierunku powierzchni, a odpowiadający temu powrotny przepływ transportuje ochłodzo-

ne skały do wnętrza. Wydaje się prawdopodobne, że to krążenie w płaszczu jest przynajmniej częściowo odpowiedzialne za ruchy płyt na powierzchni.

Choć wnętrze Ziemi jest w przeważającej części stałe, fragment jądra (ryc. 1.2), centralny obszar Ziemi o dużej gęstości, stanowiący około jednej trzeciej jej masy, pozostaje przypuszczalnie w stanie ciekłym. Więcej na temat jądra Ziemi powiemy później, na razie wystarczy zauważyć, że jest ono zbudowane przede wszystkim z metalicznego żelaza i że właśnie dlatego, w wyniku konwekcji w jego zewnętrznej ciekłej części, Ziemia ma pole magnetyczne. Wiemy o tym, chociaż nikt nigdy nie zdobył próbek jądra. Z wyjątkiem posiadającego ogromną wyobraźnię Juliusza Verne'a, żaden człowiek nigdy nie zpuścił się głębiej niż kilka kilometrów pod powierzchnię Ziemi, a nawet najgłębsze otwory wiertnicze mają mniej niż 10 kilometrów głębokości. Natomiast zewnętrzna granica jądra znajduje się na głębokości 2900 kilometrów, a jądro rozciąga się od tej granicy do centrum Ziemi na głębokość około 6370 kilometrów.

Ponieważ pozbawieni jesteśmy bezpośredniej informacji o wnętrzu Ziemi, musimy zadowolić się dowodami dostarczanymi przez geofizykę. Najbardziej użyteczne świadectwa pochodzą z badań sposobu przechodzenia przez Ziemię fal wywołanych trzęsieniami. Duże trzęsienia uwalniają ogromną ilość energii, a powstające drgania wędrują przez Ziemię w postaci fal. Mogą one być odczytywane w odległych miejscach, ponieważ, podobnie jak drgania wywołane uderzeniem młotką w stół, są odczuwane nawet na przeciwległym krańcu. Zygzaki na sejsmogramie to reakcja instrumentu na rzeczywiste drgania Ziemi. Szczegóły interpretacji tego zapisu są skomplikowane. Ostatecznym rezultatem wielu lat rejestracji sygnałów powstających w wyniku trzęsień ziemi przez wiele stacji sejsmologicznych na całym świecie jest zestaw danych pozwalający na określenie średniej prędkości fal przechodzących przez różne części wnętrza Ziemi. Ponieważ prędkości owych fal sejsmicznych są ściśle związane z gęstością materii, przez którą przechodzą, geofizycy mogli wyliczyć tę gęstość, a na jej podstawie wywnioskowali, jakie minerały występują w poszczególnych partiach Ziemi. Dane te wykazują, że struktura Ziemi jest warstwowa (ryc. 1.2) i że główne jej części mają różną gęstość i skład chemiczny. Chociaż rycina 1.2 jest uproszczeniem, to jednak ilustruje różnicowanie chemiczne Ziemi w wielkiej skali. Jest to obserwacja niezwykle istotną dla poznania wczesnej historii naszej planety, ponieważ większość naukowców uważa, że owe dziś rozdzielone składniki były gruntownie wymieszane, tworząc mniej lub bardziej jednorodną masę w momencie powstania Ziemi. O ile można to stwierdzić na podstawie dostępnych świadectw, inne planety podobne do Ziemi (Merkury, Wenus i Mars), jak również Księżyc, także uległy globalnemu chemicznemu różnicowaniu.

Książka ta dotyczy przede wszystkim procesów zachodzących na lub w skorupie ziemskiej, a dokładnie - w jej górnej warstwie

Rzut oka na rycinę 1.2 wystarczy, by stwierdzić, że pod względem masy i objętości skorupa jest mało znacząca w porównaniu z innymi partiami naszej planety. Jest to cienka skórka na Ziemi, mająca tylko 5 lub 6 kilometrów miąższości pod oceanami i 30-40 kilometrów pod kontynentami. Gdyby Ziemię skurczyć do rozmiarów jabłka, najgrubsze części skorupy miałyby mniej więcej grubość jego skórki. Pomimo tego to właśnie w skorupie występują złoża minerałów, tu powstało życie i tu jest nasz dom. To najlepiej poznana część Ziemi, ponieważ może być badana, analizowana i mierzona. Powstała ona w ciągu długiego czasu geologicznego wskutek przetapiania wnętrza planety i transportu ciekłych składników ku powierzchni.

Granica pomiędzy skorupą a niżej leżącym płaszczem zaznacza się gwałtownym wzrostem prędkości fal sejsmicznych, co jest

odbiciem przejścia do skał o znacznie większej gęstości we wnętrzu Ziemi. Skały płaszcz są bogatsze w żelazo i magnez, a uboższe w lżejsze pierwiastki, takie jak glin, niż skały w skorupie. Wiemy o tym zarówno z badań sejsmicznych, jak i pobranych próbek. Ale w jaki sposób wydobyliśmy próbki z płaszczu, skoro nawet najgłębsze wiercenia nie przebijają całej skorupy? Otóż przyroda pobrała za nas te próbki: istnieje kilka miejsc na Ziemi, gdzie lawy wulkaniczne powstające w płaszczu wyrwały stałe fragmenty otaczających skał i wyniosły je na powierzchnię. Jedną z konsekwencji tego procesu jest noszenie przez nas diamentowej biżuterii. Diamenty są odmianą węgla, będącego również głównym składnikiem węgla drzewnego - materiału raczej nie służącego do wyrobu ozdób. W wyniku wysokich ciśnień występujących w płaszczu zwykły węgiel ulega jednak przemianie w diament. Potrzebne do tego ciśnienia panują w Ziemi na głębokości około 200 kilometrów; diamenty z południowej Afryki i innych miejsc zostały wyniesione na powierzchnię przez magmy wulkaniczne, które powstały co najmniej na takiej głębokości. Oczywiście, występowanie tych pochodzących z płaszczu kamieni szlachetnych nie *oznacza*, że wewnątrz Ziemi składają się z diamentów - jako takie są one rzadkie, ale fragmenty skał, w których od czasu do czasu je znajdujemy, dostarczają nam istotnych wskazówek na temat składu płaszczu.

Rycina 1.2 pokazuje, że w rzeczywistości płyty na powierzchni Ziemi zawierają zarówno materiał skorupy, jak i płaszczu. Ich podstawa nie zaznacza się rodzajem skał; jest to raczej granica fizyczna, na której znacznie spada prędkość fal sejsmicznych. Ogólnie uważa się, że jest to głębokość, na której skały płaszczu są najbliższe punktu topienia; z powodu wysokiej temperatury i ciśnienia zachowują się plastycznie, pozwalając nadległej sztywnej płycie poruszać się ponad płaszczem, w którym zachodzi konwekcja. Sztywna zewnętrzna część Ziemi budująca płyty tektoniczne *znana* jest jako litosfera, od greckiego słowa *lithos*, oznaczającego kamień lub skałę.

Płaszcz stanowi około 2/3 masy Ziemi i został podzielony na podstawie subtelnych różnic prędkości przechodzenia fal sejsmicznych przez zewnętrzną i wewnętrzną jego część. Poniżej występuje jądro stanowiące pozostałą 1/3 masy Ziemi, które, jak już wspomniano, składa się głównie z *żelaza*. Na granicy między jądrem a płaszczem następuje gwałtowna zmiana prędkości fal sejsmicznych, odzwierciedlająca zmianę materiału - ze skalnego na metal. Niektóre typy fal nie mogą przechodzić przez ciała ciekłe. Obserwujemy, że fale te nie biegną przez zewnętrzną część jądra, co właśnie wskazuje na to, że jest ono ciekłe. Wewnętrzne jądro jest jednak stałe.

Nikt nie zna szczegółów powstania Ziemi. Aby przedstawić rozsądny scenariusz, możemy jednak ekstrapolować pewne dane. Wiemy, że Wszechświat jest znacznie starszy niż Ziemia i że większość atomów składających się na powietrze, którym oddychamy, skały (lub beton, co *zdarza* się częściej), po których sta-

pamy, i wszystkie inne części Ziemi tkwiły niegdyś wewnątrz gwiazd. Niektóre najcięższe pierwiastki, takie jak złoto, ołów i uran, powstały w gigantycznych eksplozjach supernowych - gwiazd, które zakończyły życie, wyrzucając ogromne ilości materii w przestrzeń międzygwiazdną. Wiemy, że w końcu materia ta, dziś tworząca Ziemię, stała się częścią ogromnej chmury gazowo-pyłowej, bardzo podobnej do tych, które dziś astronomowie obserwują w innych partiach naszej Galaktyki.

Z powodów nie do końca zrozumiałych około 4,6 miliarda lat temu chmura ta zaczęła się zapadać. W wyniku tego zapadania

się jej centralna część stawała się coraz gęstsza i gorętsza, podobnie jak ogrzewa się powietrze ściskane w pompce rowerowej. W samym centrum tej zapadającej się chmury, tam gdzie temperatura i ciśnienie osiągały wartości ekstremalne, rozpoczęły się reakcje jądrowe, które są źródłem energii Słońca. Nasza gwiazda, Słońce, gromadzi około 99,9 % całej materii systemu Słonecznego; planety i planetojdy są jedynie pozostałymi okruchami. W momencie narodzin Słońca temperatura była tak wysoka - przynajmniej w wewnętrznej części Układu Słonecznego, tam, gdzie znajduje się Ziemia - że wszelkie istniejące wcześniej stałe ziarna prawdopodobnie wyparowały, a wspomniane pozostałości występowały w formie gazowej. W miarę ochładzania zaczęły powstawać stałe ziarna, które się skupiały, stopniowo tworząc większe ciała. Niektóre rosły szybko, zmiatając wszystko na swej drodze, obiegając pierwotne Słońce. Inne uległy zniszczeniu w czasie spektakularnych zderzeń dużych fragmentów. Proces akrecji, w wyniku którego powstała Ziemia, był gwałtowny, a ciągły deszcz zderzających się ciał musiał ją znacznie podgrzać. Choć pierwotna mieszanka materiałów na większą skalę mogła być dość jednorodna, ciepło wytworzone w procesie akrecji doprowadziło do jej stopienia, a grawitacją powodowała, że nowe ciekłe materiały ulegały oddzieleniu od nie stopionych materiałów stałych. Zwłaszcza żelazo, które topi się w temperaturach nieco niższych niż wiele innych materiałów tworzących Ziemię, mogło stopić się wcześniej i w efekcie swojej wysokiej gęstości opaść szybko w głąb gorącej Ziemi, gdzie utworzyło jądro.

Wielkoskalowe chemiczne różnicowanie Ziemi na metaliczne jądro i okrywający je skalny płaszcz musiało nastąpić u zarania dziejów Ziemi. Powstanie skorupy to zupełnie inna historia. Wiemy, że ona również jest wynikiem przetopienia, lecz w tym wypadku przetopione materiały, w przeciwieństwie do żelaza, miały mniejszą gęstość niż otaczający płaszcz i wypłynęły na powierzchnię. Ten proces ciągle trwa: lawy wyrzucane dzisiaj z większości wulkanów są produktami przetapiania w płaszczu i tworzą nowy materiał skorupy. Skorupa, w szczególności kontynentalna, przyrasta w ciągu historii Ziemi, choć czy ten wzrost jest ciągły,

czy epizodyczny oraz czyjego tempo zmieniało się w czasie, po-



zostaje dla naukowców badających Ziemię kwestią dyskusyjną..

Geologia jest starą nauką. Pierwotny człowiek praktykował ją w formie szczątkowej: poszukiwał złóż skał dających się obra-  
biać, takich jak krzemienie czy obsydian, aby otrzymać narzędzia o ostrych krawędziach używane do polowania i wyprawiania skór. Poszukiwanie surowców mineralnych i energetycznych, które dostarczają materiałów niezbędnych dla współczesnego społeczeństwa, jest dla geologów ciągle ważnym zadaniem. Równie istotne są badania zmierzające do zrozumienia, jak funkcjonuje Ziemia, bez oglądania się na ich natychmiastowe, praktyczne znaczenie. Poza tym geologia otacza nas w życiu codziennym, choć może trudno to zauważyć, jeśli się mieszka w sercu wielkiego miasta. Lecz odwiedziny Wielkiego Kanionu lub Doliny Yose-mite, jeśli wcześniej przyswoiliśmy sobie nieco geologii, są kompletnie innym doznaniem. Wiedza, że piękno Doliny Yosemite, z jej kaskadami wodospadów jest efektem działalności lodowców, które rzeźbiły skały gór Sierra Nevada w czasie ostatniego zlodowacenia, lub świadomość kolejnych zalewów mórz, które wiele milionów lat temu odłożyły warstwa po warstwie osady odsłonięte dziś w ścianach Wielkiego Kanionu, stanowi dla większości ludzi wielce satysfakcjonujące doświadczenie.

Aby osiągnąć dzisiejszą wiedzę na temat Ziemi i jej dziejów, geolodzy musieli być historykami, detektywami, odkrywcami, inżynierami i przede wszystkim przenikliwymi obserwatorami. W coraz większym stopniu potrzebna jest im także znajomość biologii, chemii, fizyki i matematyki, ponieważ w badaniach Ziemi korzystają z osiągnięć wszystkich tych dziedzin. Poszukiwanie odpowiedzi w naukach o Ziemi dosłownie nie pozostawia żadnej skały nie poruszonej.

## ROZDZIAŁ 2

### POCZĄTKI

do interpretacji, w miarę jak cofamy się w czasie geologicznym. Początkowo, jak wspomniano w poprzednim rozdziale, Ziemia i inne planety naszego Układu Słonecznego powstały z okru-  
chów materii poruszających się po orbitach wokół Słońca. Ziemia powiększała się, zgarniając całą materię z sąsiedztwa, i osiągnęła w przybliżeniu swe obecne rozmiary przypuszczalnie w ciągu 10 milionów lat lub nawet w krótszym czasie. Choć nie wiemy dokładnie, jak szybko gromadziła się ta materia, pewne dane wskazują na jej rodzaj. Informacji tej dostarczają nam badania meteorytów.

Według Starego Testamentu Ziemia została stworzona w ciągu siedmiu dni. Większość geologów uważa, że nawet Bóg nie mógł wykonać tego zadania w tak krótkim czasie. Niemniej musiało to nastąpić dość szybko, w sensie geologicznym, co jest dość ważne, ponieważ fragmenty materii, które uległy akrecji, tworząc Ziemię, niosły ze sobą energię kinetyczną i w momencie kolizji z powiększającą się Ziemią energia ta przekształcała się w ciepło. Ilość ciepła, która raczej została pogrzebana w gwałtownie powiększającej się Ziemi niż wypromieniowana z powierzchni w przestrzeń, warunkowała temperaturę Ziemi w końcowym etapie akrecji. Im szybciej przebiegał ten proces, tym więcej ciepła ulegało zatrzymaniu i tym gorętsza stawała się nowo narodzona Ziemia. Pierwotnie była ona bez wątpienia bardzo gorąca, choć jest to zagadnienie, na temat którego nie mamy wiele informacji. Czy jej zewnętrzna część kompletnie się stopiła? Czy istniał ocean magmy na Ziemi, analogiczny do tego, który według wielu geologów pokrywał Księżyc? Czy cała Ziemia była stopiona?

Wszystkie te poglądy mają swoich zwolenników, lecz brak ostatecznego dowodu pozwalającego przyjąć którykolwiek z nich. Niestety, wskazówki geologiczne dotyczące historii Ziemi w sposób nieunikniony stają się coraz rzadsze i trudniejsze

## **Meteoryty a Ziemia**

Meteoryty są częstsze niż można sądzić. Liczba okazów w prywatnych i publicznych kolekcjach sięga tysięcy i stale przybywają nowe. Spadające gwiazdy na nocnym niebie to zwykle małe meteoroidy rozgrzane w wyniku tarcia do białości i ulegające spaleni w czasie przelotu przez ziemską atmosferę. Niewiele z nich przeżywa tę podróż i ląduje na powierzchni. Dziesiątki tysięcy meteorytów, być może nawet ponad 100 tysięcy, spada każdego roku na kontynenty, a jeszcze więcej wpada do oceanów. Większość z nich jest jednak bardzo mała i nigdy się ich nie znajduje. Te, które znaleziono, są najczęściej wielkości ziarna grochu, rzadziej - piłki do koszykówki lub nawet znacznie większe. W miarę jak Ziemia staje się coraz gęściej zaludniona, coraz więcej spadających meteorytów natychmiast odszukuje się i rozpoznaje. Niektóre uderzały nawet w samochody i domy.

Jednym z najbogatszych źródeł meteorytów do badań na-

ukowych jest w ostatnich latach Antarktyda. Meteority spadające na czapę lodową grzezną w śniegu i lodzie, w końcu przenoszone są jednak przez lodowce, sunące wolno od bieguna w kierunku morza. Początkowo strumień lodowy pogrąża je głęboko pod powierzchnią, lecz tam, gdzie lód napotyka pogrzebane grzbiety górskie, wędrują wraz z nim ponownie ku górze. W takich regionach silne suche wiatry Antarktydy doko-

nują ablacji lodu bardzo szybko od chwili jego pojawienia się na powierzchni. Jednakże meteority niesione przez lód pozostają. Te z nich, które spadały na Ziemię w ciągu tysięcy lat, w wyniku tego procesu mogą gromadzić się na małym obszarze, a ponieważ w tym morzu lodu wokół jest niewiele innych skał, łatwo je zauważyć. Geolodzy z kilkunastu krajów organizują co rok w czasie południowego lata ekspedycje na Antarktyde, aby za pomocą skutera śnieżnego lub helikoptera poszukiwać skarbu - meteorytów.

W przeszłości przypisywano meteorytom specjalną moc - jako przybywające z niebios, uważano je za wysłanników bogów. Później stwierdzono, że tak jak kamień z Rosetty, zawierają informacje o najwcześniejszej historii Układu Słonecznego. Choć istnieje wiele odmian meteorytów, niektóre wydają się w zasadzie nie zmienione od momentu ich powstania 4,5 miliarda lat temu, mniej więcej w tym czasie, kiedy formowała się Ziemia. Najprawdopodobniej ich skład jest bardzo zbliżony do oryginalnego materiału, z którego nasza planeta powstała w procesie akrecji. Podczas najbliższej wizyty w lokalnym muzeum historii naturalnej powinieneś poświęcić nieco czasu meteorytom. Choć pozornie wyglądają jak zwykłe skaty, nie są nimi. Przeciwnie, to zadziwiający wysłannicy z przeszłości, którzy mogą opowiedzieć nam wiele o czasach, kiedy Układ Słoneczny dopiero się tworzył.

Chondryty, bo tak nazywają się najbardziej prymitywne meteority, uważa się za fragmenty materiału z pasa planetoid, leżącego pomiędzy Marsem a Jowiszem. Zbudowane są głównie z minerałów częstych w ziemskich skałach, lecz zawierają również metaliczne żelazo, bardzo rzadko występujące w stanie rodzimym na powierzchni Ziemi. W poprzednim rozdziale dowiedzieliśmy się, że żelazo topi się w temperaturze niższej niż wiele pospolitych minerałów. Większość metalicznego żelaza dostarczonego w materiałach chondrytopodobnych na tworzącą się Ziemię podczas akrecji uległa stopieniu i opadła do centrum planety, tworząc jądro.

Ponieważ Ziemię zbudowana jest z różnych chemicznie fragmentów, takich jak jądro, płaszcz oraz skorupa, i ponieważ

możemy pobrać próbki tylko najbardziej zewnętrznych z nich, określenie ogólnego składu chemicznego planety było trudnym zadaniem. Chondryty jednak mogą być analizowane w laboratorium. Jeśli naprawdę reprezentują one materiał, który w wyniku akumulacji stworzył Ziemię, wówczas ich analiza pomoże

nam określić skład chemiczny całej Ziemi - i jest to naprawdę zdumiewająca perspektywa. Lecz czy rzeczywiście reprezentują one przeciętną materię Układu Słonecznego, która musiała być pierwotnym składnikiem Ziemi? Istnieją mocne dowody na to, że tak jest naprawdę. Dostarczają ich badania Słońca, które zawiera prawie całą masę systemu, a więc jest z definicji przeciętnym materiałem Układu Słonecznego. Analizując wysyłane przez Słońce światło, zdołaliśmy uzyskać ogromną ilość informacji o jego składzie chemicznym. Z wyjątkiem małej liczby pierwiastków, które występują w postaci gazowej, względna ich zawartość w chondrytach jest prawie dokładnie taka sama jak na Słońcu, co stanowi dobrą wskazówkę, że owe materiały nie uległy żadnemu znaczącemu frakcjonowaniu chemicznemu. Tak więc badania meteorytów, w połączeniu z wiedzą na temat gęstości wnętrza Ziemi, uzyskaną w wyniku badań sejsmicznych, umożliwiły nie tylko określenie ogólnego składu chemicznego Ziemi, lecz nawet poznanie budowy obszarów, z których nigdy nie pobrano próbek, takich jak głęboki płaszcz i jądro.

### **Ile lat ma nasza planeta?**

Wspomniano już wcześniej, że Ziemia liczy miliardy lat. Jest to pogląd obecny; idea Jamesa Usshera (teologa, który wyliczył na podstawie zapisu biblijnego, że Ziemia została stworzona w roku 4004 p.n.e.) panowała niepodzielnie do dziewiętnastego wieku. A tak naprawdę to nawet dzisiaj są tacy, którzy ignorują przytaczające dowody naukowe i twierdzą, że biblijne legendy przekazują prawdziwą opowieść o powstaniu i historii Ziemi.

Przyjmowany obecnie wiek Ziemi, równy 4,5 miliarda lat, został ustalony dopiero w połowie lat pięćdziesiątych. Precyzyjne

jego określenie jest problemem bardzo skomplikowanym technicznie, lecz zasadniczo opiera się na tym, że naturalnie występujące izotopy promieniotwórcze ulegają rozpadowi ze stałą prędkością. Jeśli znane jest dobrze tempo rozpadu, można zmierzyć, ile produktu rozpadu nagromadziło się w próbce w danym czasie, i w dość prosty sposób określić wiek. Zastosowanie rozpadu radioaktywnego do datowania próbek geologicznych będzie omówione bardziej szczegółowo w rozdziale 6. Warto jednak wspomnieć teraz, że istnieje kilka izotopów występujących w zwykłych skałach, które mogą posłużyć do datowania. Izotopy danego pierwiastka mają te same właściwości chemiczne, lecz nieco różną budowę jądra. Nie wszystkie izotopy są promieniotwórcze, czyli nie wszystkie się rozpadają, tworząc nowe izotopy zupełnie innego pierwiastka. Dwa najlepiej znane pierwiastki mające promieniotwórcze izotopy to tor i uran. W czasie rozpadu promieniotwórczego przekształcają się one w izotopy ołowiu. Tak więc część ołowiu występującego na Ziemi, a tak naprawdę w ca-

łym Układzie Słonecznym, nie istniała w momencie powstania Ziemi, lecz została stworzona w czasie geologicznym w procesie stopniowego rozpadu toru i uranu.

Ponieważ każdy z izotopów toru i uranu przechodzi w ołów w innym tempie, próbki zawierające owe pierwiastki mają wbudowane niezależne „zegary” geologiczne, którymi można się posłużyć do określenia ich wieku. Oznacza to również, że dokładna mieszanka izotopów ołowiu w konkretnym materiale jest zwykle inna niż w pozostałych i zależy od jego wieku oraz ilości toru i uranu w nim zawartych. W latach pięćdziesiątych Clair Patterson z California Institute of Technology w Pasadenie odkrył, że zarówno meteoryty, jak i próbki pochodzące z Ziemi charakteryzuje taka sama zawartość izotopów ołowiu. Używając specjalnie dobranych próbek, aby reprezentowały tak ściśle, jak to tylko możliwe, przeciętne ilości izotopów ołowiu na Ziemi, wraz z serią próbek chondrytowej grupy meteorytów, Patterson odkrył systematyczne zależności wskazujące na to, że wszystkie ciała - Ziemia i różne chondryty - musiały powstać ze wspólnej pierwotnej materii 4,5-4,6 miliarda lat temu.

Odkrycie Pattersona było niezwykle ważne dla geologii. Nie tylko pozwoliło ustalić wiarygodny wiek Ziemi, lecz również powiązać narodziny naszej planety z powstaniem innych materiałów Układu Słonecznego. Jeden z pierwszych badaczy, osiemnastowieczny arystokrata i znakomity geolog James Hutton, powiedział, że nie znajduje „śladów początku ani zapowiedzi końca”. Badania Pattersona ustaliły jednak w sposób zdecydowany, kiedy nastąpił początek. I choć od lat pięćdziesiątych w dziedzinie badań izotopów promieniotwórczych odnotowano ogromny postęp techniczny, podstawowe wnioski Pattersona pozostają niepodważone.

Liczbę 4,5 miliarda lat bardzo łatwo wypowiedzieć. Studenci i profesorowie geologii oswoili się z nią, lecz jest to liczbą ogromną, o wiele za dużą, aby ją pojąć z perspektywy dostępnej człowiekowi. Zapisana z zerami daje nieco lepsze wyobrażenie o wieku Ziemi: 4 500 000 000 lat. Cztery i pół miliarda monet jednogroszowych utworzyłoby stos wysoki na około 6,5 tysiąca km - to nieco więcej niż odległość z powierzchni Ziemi do jej centrum.

## **Pierwsze 600 milionów lat**

Choć wiemy już, kiedy powstała Ziemia, to następny rozdział ziemskiej historii jest właściwie niezapisaną kartą. Nie znamy zapisu skalnego prawie 600 milionów lat od powstania naszej planety. Jak dotąd najstarsze próbki skał znalezione na Ziemi pochodzą z Terytoriów Północno-Zachodnich w Kanadzie. Ich wiek został określony na podstawie analizy zawartych w nich izotopów ołowiu na nieco powyżej 3,9 miliarda lat. Skały te uległy silnemu metamorfizmowi, tak że trudno jest powiedzieć co-

kolwiek o ich pochodzeniu. Nie różnią się jednak zdecydowanie od wielu typowych skał kontynentalnych młodszego wieku. Wiemy więc dzięki nim, że 3,9 miliarda lat temu istniały co najmniej pewne fragmenty skorupy kontynentalnej.

Pytanie, kiedy powstały pierwsze kontynenty, od dawna intrygowało geologów, ponieważ nie ulega wątpliwości, że skorupa

kontynentalna powiększała się i zmieniała w czasie geologicznym. Prawdopodobnie, nawet przed powstaniem skał liczących 3,9 miliarda lat istniały jakieś małe kontynenty. Wskazówki prowadzące do takiego wniosku są rzadkie, słabe i prawie tak trudne do odkrycia, jak przysłowiowa igła w stogu siana. Lecz gdzie należy ich szukać? Odpowiedź dostarcza dobrego przykładu sposobu, w jaki często postępują geolodzy: używają teraźniejszości jako okna w przeszłość. Wiemy, że dziś produkty erozji gromadzą się na krawędziach kontynentów, i nie ma żadnego powodu, aby podejrzewać, że w przeszłości było inaczej. Nawet te najwcześniejsze kontynenty musiały mieć plażę. Istnieje więc pewna szansa, że jeżeli niektóre z owych bardzo starych osadów się zachowały, to mogą zawierać ziarna mineralne wyerodowane z jeszcze starszych kontynentów.

Tak więc geolodzy przebadali dokładnie niektóre najstarsze znane piaskowce, odłożone przypuszczalnie wzdłuż wybrzeży starych kontynentów, poszukując ziarn mineralnych szczególnie odpornych na zniszczenie podczas wietrzenia i transportu. Jedna z grup natrafiła na właściwe źródło w piaskowcach sprzed 3,6 miliarda lat w zachodniej Australii. Niektóre z ziarn w owych skałach są znacznie starsze niż sam piaskowiec i wyraźnie przeszły wiele cykli erozji, osadzania, lityfikacji, wypiętrzania i ponownej erozji. William Compston i jego koledzy z Narodowego Uniwersytetu Australijskiego w Canberze stwierdzili, że niektóre ziarna odporne na wietrzenie minerału -cyrkonu - z tych starych piaskowców liczą sobie od 4,1 do prawie 4,3 miliarda lat.

Kryształy cyrkonu są drobne, lecz często występują w skałach magmowych. Podnosząc garść piasku na plaży lub gleby gdziekolwiek, możesz trzymać w ręku kilka ziarn cyrkonu, ponieważ procesy wietrzenia i erozji niszczące macierzyste skały mają niewielki wpływ na kryształy cyrkonu. Ich twardość i odporność sprawia, że duże przezroczyste kryształy cyrkonu są często sprzedawane jako kamienie szlachetne. Lecz najbardziej użyteczne dla geologów są małe ziarna cyrkonu przenoszone na duże odległości przez strumienie lub wiatr. Stają się

one wskaźnikami pierwotnego źródła materiału osadowego, w którym dziś występują.

Zgodnie z nazwą są one bogate w pierwiastek zwany cyrkonem. Na szczęście, tworząc się, przyłączają także znaczące ilości uranu, a jak już wiemy, rozpad promieniotwórczy uranu wytwarza izotopy ołowiu, dzięki którym można określić wiek ziarna. Współczesne techniki są tak czułe, że można dokładnie zmierzyć nawet znikome ilości ołowiu w małym ziarnie cyrkonu; wystarczają one

do określenia wieku ziarna. W ten właśnie sposób datowano ziarna wydobyte z piaskowców australijskich.

Ponieważ te stare cyrkony są pojedynczymi ziarnami, a nie fragmentami skał, trudno jest coś powiedzieć o typach skał, z których zostały wyerodowane. Cyrkony są jednak pospolite w takich skałach kontynentalnych, jak granit, za to praktycznie nieobecne w bazaltach powszechnych na dnie oceanu. Wynika z tego, że ziarna te muszą pochodzić ze skał kontynentalnych. Jeśli tak jest rzeczywiście, istnienie kontynentów można cofnąć w czasie do prawie 4,3 miliarda lat temu, czyli tylko kilkaset milionów lat po utworzeniu się Ziemi. Te wczesne fragmenty skorupy ziemskiej mogły być jednak zupełnie inne od kontynentów, które znamy dzisiaj, i, oczywiście, musiały być znacznie mniejsze.

Nawet jeśli skorupa ziemska zaczęła powstawać bardzo wcześnie, istnieje kilka możliwych przyczyn, dla których nie zachowało się nic z pierwszych 600 milionów lat istnienia naszej planety. Jedną z nich jest to, że przez większość tego okresu grawitacja czyniła Ziemię podatną na silne bombardowanie z przestrzeni przez materiał pozostały z procesu akrecji. Drugim powodem jest to, że, jak wcześniej zauważyliśmy, wczesna Ziemia była bardzo gorąca. Intensywna konwekcja zachodząca w gorącej Ziemi mogła po prostu zniszczyć większość wczesnie powstałej skorupy. Choć znaczna część ciepła pochodziła z procesu akrecji, musiało ono także być wynikiem głównego wydarzenia w najwcześniejszej historii Ziemi: powstania jądra.

W miarę jak planeta rozgrzewała się w czasie formowania, metaliczne *żelazo*, które zawierała, zaczęło się topić, tworząc

małe zbiorniki płynnego żelaza; osiągały one w końcu dość znaczne rozmiary. Stopione żelazo, mając znacznie większy ciężar właściwy niż otaczająca je materia, opadało w kierunku centrum Ziemi. Sąsiednie minerały nie uległy stopieniu, lecz również były gorące i plastyczne, co wspomagało ten proces. Ocenia się, że jednokilometrowa kula stopionego *żelaza* dotarłaby z powierzchni do centrum wczesnej, gorącej Ziemi w czasie krótszym niż milion lat.

Procesy topienia się, nagromadzania i opadania *żelaza*, prowadzące do powstania metalicznego jądra Ziemi, wystąpiły bardzo wcześnie, przypuszczalnie podczas głównej fazy akrecji, a może wkrótce po niej. Oznacza to, że najpóźniej w ciągu kilkudziesięciu milionów lat od momentu powstania Ziemia była już planetą zróżnicowaną pod względem chemicznym i miała metaliczne jądro oraz skalną otoczkę. Ta ważna chemiczna przebudowa od początkowo znacznie bardziej jednorodnego stanu była czasami nazywana katastrofą żelaza, ponieważ z niektórych analiz wynikało, że proces ten przebiegał wybuchowo, z uwalnianiem dużych ilości energii, przypuszczalnie wystarczających do stopienia całej Ziemi. W jednym z opublikowanych opisów tego zdarzenia zasugerowano, że

znaczną część metalu występującego dziś w jądrze nagromadziła się w formie pierścienia lub otoczki płynnego materiału wokół chłodniejszej centralnej części nowo powstałej Ziemi. W wyniku opadania z tej otoczki w kierunku centrum gigantycznych „kropli” płynnego metalu zmiana rozkładu masy wewnątrz wirującej planety powodowała ogromne naprężenia, gwałtownie rozrywając stałe części jej wnętrza i zastępując je stopionym żelazem. Czy jest to dokładny scenariusz rzeczywistych wydarzeń, nie wiemy. Bez względu jednak na sposób, w jaki żelazo dotarło do wnętrza Ziemi, następowało uwalnianie dużych ilości energii, co powodowało dalsze podgrzewanie naszej planety.

Tak więc pierwsze dni historii Ziemi musiały być bardzo chaotyczne, z silnym wulkanizmem, a przypuszczalnie istniało nawet na powierzchni morze stopionych skał. Początkowo brakowało atmosfery. Związki chemiczne, takie jak woda

i dwutlenek węgla oraz różne lotne pierwiastki, znalazły się na Ziemi związane w materiale akrecyjnym i stopniowo były uwalniane z gorącego wnętrza w postaci gazów wulkanicznych, tworząc wczesną atmosferę. W miarę jak ustawał proces akrecji, ciągle deszcz dużych i małych obiektów z przestrzeni przedzierał się przez tę otoczkę gazową, bombardując powierzchnię. Człowiekowi podróżującemu w czasie, Ziemia wydałaby się obca i nieprzyjazna nawet kilkaset milionów lat po powstaniu. Istniała już prawdopodobnie na jej powierzchni woda w postaci płynnej, lecz nie istniało życie - nie było roślin ani zwierząt - a atmosfera nie nadawała się do oddychania, ponieważ nie zawierała tlenu. Nie powstały jeszcze wielkie kontynenty, w dzisiejszym tego słowa znaczeniu, i choć musiało być wiele wulkanów, nie wypiętrzyły się rozległe grzbiety górskie, takie jak Góry Skaliste czy Alpy.

Być może nawet przez jakiś czas swojej wczesnej historii Ziemia znajdowała się okresowo w stanie głębokiego zamrożenia - zamrożone morza pokrywały większość powierzchni. Taka możliwość wynika z tego, że Słońce, jeśli przechodziło normalną drogę ewolucji gwiazd o swojej masie, było zdecydowanie słabsze, wydzielając przez pierwszy okres istnienia znacznie mniej energii niż dzisiaj. Pomimo ciepła dostarczanego przez wulkany i zderzenia, temperaturę na Ziemi kontrolowała ostatecznie energia słoneczna. Po początkowym gorącym stadium, które mogło trwać nawet kilkaset milionów lat, powierzchnia Ziemi się ochłodziła, a przy słabym Słońcu temperatura mogła być wystarczająco niska, aby spowodować zamrożenie ówczesnych oceanów. Faktycznie, niektórzy naukowcy twierdzą, że gdyby Ziemia raz została pokryta przez lód i śnieg silnie odbijający promieniowanie, to tak dużo energii słonecznej musiałoby być odbijane z powrotem w przestrzeń, że powierzchnia nie mogłaby już nigdy się stopić, nawet przy znacznie silniejszym Słońcu. Ten argument oraz to, że dzisiaj Ziemia jest przeważnie przyjemnie ciepła, służy im za dowód, iż



nigdy nie doszło do wczesnego głębokiego zamrożenia. Jak się przekonamy jednak w następnym rozdziale, są inne sposoby, aby stopić lód.

## Archaik

Pierwszą dużą jednostką czasu geologicznego jest archaik (ryc. 1.1). Był on bardzo długi i trwał od momentu powstania Ziemi, kończąc się 2,5 miliarda lat temu, a więc obejmował w przybliżeniu 44% historii naszej planety. Oczywiście, geologiczna skala czasu jest tworem naukowców i wiele musiało się wydarzyć podczas archaiku; gdybyśmy tylko wiedzieli o tych zdarzeniach, stałyby się podstawą do dalszych podziałów. Mimo długości archaiku wiemy jednak bardzo mało o jego historii. Wynika to również z faktu, że jedynie niewielka część powierzchni Ziemi jest dzisiaj zbudowana ze skał, które rzeczywiście powstały w tamtym okresie. Przekonaliśmy się już przecież, że nie ma właściwie skał z pierwszych 600 milionów lat.

Skały archaiczne są przedmiotem intensywnych badań, chociaż (a może ponieważ) występują one rzadko. Wiemy na przykład, że w niewielkich ilościach można je znaleźć na wszystkich głównych kontynentach. Czasami skały te znajdują się w ich centrum, zawsze jednak otoczone przez skały młodsze. Układ taki dostarcza wskazówek o tym, jak rosły kontynenty. Istnieją dowody, wynikające z ich wieku, że kontynenty podczas tego eonu rosły okresowo; nie jest to jednak pewne z powodu małej ilości skał archaicznych; niewykluczone też, że zachowały się one w sposób selektywny. Pewne skamieniałości znalezione w osadach archaicznych to szczątki pradawnych pojedynczych komórek bakterii. Dokładne badania przeprowadzone w ostatnich latach wykazały, że są one liczniejsze, niż kiedyś sądzono, choć w dalszym ciągu rzadkie. Niemniej świadczą o tym, że w środkowym archaiku istniało już dobrze rozwinięte życie.

Australijskie cyrkony wskazują na to, że już 4,2 lub 4,3 miliarda lat temu mogły istnieć małe kontynenty. W ciągu całego czasu geologicznego, poczynając od archaiku aż po dzień dzisiejszy, przetapianie wnętrza i wnoszenie stopionego materiału na powierzchnię Ziemi powoduje wytwarzanie skorupy kontynentalnej. Jednakże nawet dzisiaj kontynentalna część skorupy ziemskiej stanowi bardzo małą część Ziemi jako cało-

ści, co wyraźnie widać na rycinie 1.2. Ma ona również bardzo odmienny od reszty planety skład chemiczny. Niektóre inne planety w Układzie Słonecznym mają skorupę, lecz kontynenty wydają się istnieć jedynie na Ziemi. W rezultacie niewiele, jeśli w ogóle jakiegokolwiek, ze zróżnicowanych surowców mineralnych ziemskich kontynentów, dostarczających większości materiałów koniecznych współczesnej cywilizacji, może występować na innych planetach. Dlaczego nie ma kontynentów gdzie indziej? Odpowiedź ma przypuszczalnie związek z obecnością na Ziemi

wody w stanie płynnym.

Woda w skałach, podobnie jak sól dodana do lodu, obniża ich temperaturę topnienia; wpływa także na skład magmy powstałej w procesie przetapiania. Na Ziemi procesy tektoniki płyt dostarczają wodę do już gorącego wnętrza, powodując jego topnienie. Bogata w wodę skorupa oceaniczna jest wciągana w dół, do płaszcza, w obrębie wielkich rowów oceanicznych i usuwana w miarę wzrostu temperatury. To właśnie ten proces jest odpowiedzialny za istnienie tak zwanego pierścienia ognia wokół Pacyfiku; wulkany stanu Waszyngton, w Chile, na Alasce i w Japonii znajdują się nad regionami, gdzie dno Pacyfiku jest wpychane do wnętrza Ziemi, co powoduje uwalnianie wody i rozpoczyna topnienie. Powstająca w rezultacie stopiona materia ma mniejszą gęstość niż jej otoczenie i unosi się ku powierzchni, dodając z ziemskiego wnętrza nowy materiał do kontynentów. Istnieją znaczne rozbieżności wśród geologów na temat momentu, w którym rozpoczął się proces, nazywany tektoniką płyt. Obecność archaicznej skorupy kontynentalnej dowodzi, że woda była dostarczana z powierzchni do wnętrza bardzo wcześnie w historii Ziemi, przypuszczalnie w podobny sposób jak to się dzieje dzisiaj.

Archaik skończył się 2,5 miliarda lat temu. Jego granica z proterozoikiem jest jedyną granicą na rycinie 1.1, która nie została zdefiniowana na podstawie zmian zespołów skamieniałości występujących w skałach. Choć życie było już w tym czasie dobrze rozwinięte, bakterie archaiku nie miały łatwo zachowujących się szkieletów lub muszli, a więc nie spotyka się ich zbyt często. Nie ulegały one również szybkiej ewolucji i z tego

powodu nie są szczególnie dobrymi wyznacznikami czasu. Jako wskaźniki czasu geologicznego, skamieniałości stają się najbardziej użyteczne od okresu kambryjskiego, kiedy to nastąpił rozkwit różnorodnych organizmów mających twarde części szkieletowe. W ten sposób wiek granicy archaik-proterozoik, ustalony na 2,5 miliarda lat, jest w pewnym sensie liczbą umowną; wybrana ona została na podstawie ogólnych obserwacji, będących rezultatem wielu lat badań. Świadczyły one o tym, że coś się zmieniło w zapisie geologicznym w tym mniej więcej czasie - na przykład skład chemiczny powstających skał i charakter nielicznych zidentyfikowanych szczątków kopalnych, w zakresie, w jakim to można stwierdzić. Ale odmienne niż w wypadku innych linii, dzielących geologiczną skalę czasu, nie ma takiego miejsca na świecie, gdzie można by położyć rękę na skałach, określających tę granicę.

Najstarsze skały archaiczne, będące rozpoznawalnymi skałami osadowymi, pochodzą sprzed 3,8 miliarda lat. Występują one w zachodniej Grenlandii i stanowią potwierdzenie, że w tym czasie istniały kontynenty i oceany oraz że procesy erozji i sedymentacji zachodziły wówczas podobnie jak dzisiaj. Lecz Ziemia, nawet po 800 milionach lat od swoich narodzin, była ciągle pustkowiem, a atmosfera nie zawierała jeszcze tlenu.

Pomimo to - i choć skały tego wieku dostarczają tylko pośrednich dowodów - życie w postaci mikroorganizmów lub organizmów jednokomórkowych najprawdopodobniej już istniało. W jaki sposób życie mogło w ogóle powstać i jak się przypuszczalnie rozwinęło - to temat następnego rozdziału.

## ROZDZIAŁ 3

### WSPANIAŁE ŻYCIE

*Wspaniałe życie (Wonderful Life)* to książka o ewolucji życia la Ziemi, napisana przez Stephena J. Goulda, paleontologa z Uniwersytetu Harvarda. Gould zaczerpnął tytuł z klasycznego filmu *To jest wspaniałe życie*, ponieważ świetnie odzwierciedla on treść książki, opisującej zdumiewającą różnorodność życia, które pojawiło się w momencie nazywanym eksplozją kam-bryjską. Gould prześledził również chaotyczny sposób, w jaki ono powstało. Skamieniałości obecne w skałach osadowych, bardzo rzadkie do tego momentu, nagle stają się bardzo liczne. Niektóre z nich są tak przedziwne, że stanowią wyzwanie dla wyobraźni. W jaki sposób występujące wówczas organizmy się poruszały? Co jadły? Do czego tak naprawdę służyły ich niewiarygodne wyrostki? Niektóre z tych wspaniałych istot pokazane zostały na rycinie 7.3. Życie na Ziemi zaczęło się jednak na długo przed wielką kambryjską ekspansją, przypuszczalnie nawet ponad 2 miliardy lat przed nią. Tymi okrytymi mgiełką tajemniczy początkami, gdzieś we wczesnym archaiku, zajmiemy się najpierw.

## **Na początku**

Filozofowie  
i myśliciele  
objaśniali  
powstanie  
życia od  
tysiącleci.  
Niektórzy  
uważali, że  
życie jest  
wieczne i  
nie miało  
początku.

Arystoteles, który ukształtował sposób myślenia na dwa tysiąclecia, uważał, że niektóre formy życia, a być może wszystkie, powstały spontanicznie. Ta idea, którą wielu podlegało, opierała się na dostępnych obserwacjach: rośliny wyrastają nagle z urodzajnej ziemi po deszczach, a larwy pojawiają się w rozkładającym się mięsie. W latach dwudziestych naszego wieku rosyjski biochemik Aleksander Oparin zaproponował i rozwinął ideę, że życie powstało w ciepłym, wodnym środowisku na powierzchni wczesnej Ziemi, w atmosferze złożonej głównie z metanu - naturalnego gazu służącego dziś do ogrzewania naszych domów i gotowania posiłków. Oparin uważał, że wczesne morza były bogate w proste cząsteczki organiczne, reagujące ze sobą i tworzące bardziej złożone cząsteczki, co w końcu doprowadziło do powstania białek i życia. Bliższe trzydzieści lat po opublikowaniu przez Oparina jego teorii, Stanley Miller, doktorant z Uniwersytetu Chicagowskiego (gdzie pracował laureat Nagrody Nobla Harold Urey), wykazał, że aminokwasy, składniki białek koniecznych dla życia, mogły powstać w warunkach, które, jak wówczas uważano, dominowały na wczesnej Ziemi. Eksperyment Millera był bardzo elegancki. Dokonywał on wyładowań elektrycznych w mieszaninie metanu, wodoru, amoniaku i pary wodnej, a po zanalizowaniu rezultatów stwierdził, że otrzymał aminokwasy. Wyładowania elektryczne były odpowiednikiem błyskawic, a mieszanina gazów miała przypominać wczesną atmosferę, tak jak ją sobie wówczas wyobrażano. Aminokwasy jako takie nie mogą ulegać replikacji; nie są też żywe. Niemniej eksperyment ten od dawna jest uważany za kamień milowy w odtwarzaniu procesu naturalnej syntezy aminokwasów, który musiał być jednym z najważniejszych kroków ewolucji życia na Ziemi. Jak jednak wkrótce się przekonamy, nie wydaje się dziś prawdopodobne, aby doświadczenia Millera-Ureya mogły bezpośrednio odtwarzać zdarzenia we wczesnym archaiku.

Zrozumienie powstania życia utrudnia to, że nie wiemy na pewno, jakie warunki panowały na wczesnej Ziemi. Możemy czynić jedynie uzasadnione przypuszczenia. Na przykład przez dość długi okres po powstaniu Ziemi, być może nawet przez kilkaset milionów lat, jej powierzchnia musiała być znacznie gorętsza niż dzisiaj. Nieustanne upadki dużych i małych meteoroidów dostarczały zapewne dodatkowo energii cieplnej. W najwcześniejszej ziemskiej historii takie większe spadające ciała mogły przebijać się przez stygnącą skorupę i odsłaniać leżący niżej materiał. Do atmosfery, wraz z lawą wypływającą na powierzchnię, musiały być uwalniane duże ilości gazów wulkanicznych, powodując efekt cieplarniany znacznie silniejszy niż ten, który uznawany jest za rezultat działalności człowieka. Z dużym prawdopodobieństwem wczesna atmosfera Ziemi miała kilkakrotnie większą gęstość niż dzisiaj, a morza i oceany były gorętsze. Niektórzy uważają również, że z powodu wysokiego ciśnienia atmosferycznego temperatura oceanów była wyższa od dzisiejszej temperatury wrzenia wody; ta wczesna Ziemia

musiała być prawdziwym szybkowarem. Życie, jakie znamy, jest jednak dość wrażliwe na temperaturę i nie wiemy o żadnych współczesnych organizmach, które potrafią przetrwać w temperaturze dużo wyższej od  $100^{\circ}\text{C}$ . Nie wydaje się więc prawdopodobne, aby życie powstało, zanim temperatura powierzchni spadła do takiego właśnie lub niższego poziomu.

Choć nie znamy dokładnie składu wczesnej atmosfery, to jednak postęp w tej dziedzinie w ostatnich latach pozwala stwierdzić z całą pewnością, że atmosfera bogata w metan, jak to proponował Oparin, a także mieszanka metanu, amoniaku i wodoru, użyta przez Millera w jego eksperymentach, nie odpowiadają rzeczywistości. Na podstawie badań najbliższych nam planet, Marsa i Wenus, a także dowodów pochodzących z ziemskich skał osadowych, wydaje się prawdopodobne, że wczesna atmosfera ziemską była raczej bogata w dwutlenek węgla niż w metan. Dwutlenek węgla jest najpospolitszym gazem w atmosferze zarówno Marsa, jak i Wenus. Na Ziemi natomiast stanowi on tylko jeden ze składników. Ogromne zasoby tego związku są jednak pogrzebane w skałach osadowych skorupy ziemskiej, w ilościach wystarczających, by w wypadku ich uwolnienia atmosfera nasza stała się bardzo zbliżona do występującej na sąsiednich planetach. Odpowiedź na pytanie, w jaki sposób gazowy  $\text{CO}_2$  znalazł się w skorupie, przynosi to, co geolodzy nazywają cyklem węglowym. W wyniku następują-

cych po sobie reakcji chemicznych dwutlenek węgla z atmosfery przechodzi do oceanów, gdzie występuje w postaci rozpuszczonej. W wodzie morskiej łączy się z wapniem, aby następnie wytrącić się jako węglan wapnia, będący głównym składnikiem wapieni - materiałem, który zatyka rury kanalizacyjne i osadza się jako kamień w czajniku. W ciągu czasu geologicznego tak wiele  $\text{CO}_2$  z atmosfery zostało przekształcone w wapienie, że obecnie zawierają one 100 tysięcy razy więcej dwutlenku węgla niż atmosfera. Znaczna ilość  $\text{CO}_2$  została również usunięta z atmosfery przez rośliny w procesie fotosyntezy, aby następnie przekształcić się w materię organiczną, która ostatecznie została pogrzebana i przekształcona w węgiel, ropę naftową i gaz naturalny. Spalanie tych naturalnych paliw przywraca ów dwutlenek węgla atmosferze i częściowo przyczynia się do tak dziś powszechnie diskutowanego efektu cieplarnianego i globalnego ocieplenia.

W atmosferze bogatej w dwutlenek węgla nie działa metoda wyładowań elektrycznych, stosowana przez Millera-Ureya w celu otrzymania aminokwasów. Jeśli wczesna atmosfera była rzeczywiście bogata w dwutlenek węgla, to wytwarzanie związków organicznych niezbędnych do powstania życia musiało następować inaczej. Ponieważ nie istnieje zapis geologiczny najwcześniejszych zdarzeń na naszej planecie, szczegóły tych procesów nie są znane i prawdopodobnie takie pozostaną. Zaproponowano jednak wiele wiarygodnych rozwiązań. Podobnie jak na dzisiejszej Ziemi, istniały wtedy przypuszczalnie niezliczone mikrosrodowiska, charakteryzujące się różnymi

temperaturami, składem chemicznym i czerpiące energię z odmiennych źródeł. Co więcej, wiele związków organicznych, nawet aminokwasy, znaleziono w meteorytach. Radioastronomowie odkryli również związki organiczne w przestrzeni międzygwiazdowej, a badania komety Halleya w czasie jej ostatniego zbliżenia do Ziemi wykazały, że jest ona bogata w substancje organiczne. Nie ulega więc wątpliwości, że wiele związków organicznych przybyło na Ziemię we wczesnym archaiku z przestrzeni kosmicznej na ciałach zderzających się z Ziemią i zostało rozrzuconych po całej powierzchni. Lecz życie w pełni rozwinięte nie powstało

z takich prostych cząsteczek, a wytworzenie złożonych spolimeryzowanych makrocząsteczek i systemów chemicznych zdolnych do reprodukcji dzieli od nich ogromna przepaść. Różne drogi mogące prowadzić do początków życia są intensywnie badane przez chemików; na przykład jeden kierunek poszukiwań wskazuje na istotną rolę zjawisk powierzchniowych. Wydaje się prawdopodobne, że powierzchnie występujących w przyrodzie materiałów, takich jak ziarna mineralne, pełniły rolę matryc dla organizujących się, a może nawet ulegających replikacji, złożonych cząsteczek. Brak dokładnego zapisu pozwala nam jedynie przypuszczać, że w ciągu dość długiego czasu reakcje pomiędzy różnymi, coraz bardziej złożonymi cząsteczkami organicznymi wytworzyły w końcu związki i struktury zdolne do reprodukcji - i w tym momencie zaczęło się życie.

Na jakimś bardzo wczesnym etapie tego procesu rozwinęły się błony, pozwalające niektórym z cząsteczek organicznych na segregację i gromadzenie się w środowisku nieco różnym od występującego na zewnątrz błony; innymi słowy - powstały komórki. I rzeczywiście, najstarsze skamieniałości, te najdawniejsze, namacalne świadectwa istnienia życia, są zachowanymi małymi komórkami, przypominającymi niektóre współczesne bakterie. Owe obiekty występują w skałach archaiku, które mają 3,5 miliarda lat.

### **Dlaczego trwało to tak długo?**

Choć 3,5 miliarda lat to, według wszelkich standardów, bardzo dawno temu, warto pamiętać, że jest to również miliard lat od momentu powstania Ziemi. Minęła więc już wówczas więcej niż jedna piąta jej historii. Jednym z powodów braku rozpoznawalnych skamieniałości starszych niż 3,5 miliarda lat może być to, że istnieje bardzo niewiele skał starszych, a nie ma żadnych liczących więcej niż 3,9 miliarda lat. Poza tym wszystkie znane skały wczesnoarchaiczne podlegały metamorfozie, co mogło spowodować zniszczenie zawartych w nich niegdyś dowodów istnienia życia. Pewne wskazówki wszakże świadczą

O tym, że żywe organizmy występowały znacznie wcześniej niż 3,5 miliarda lat temu. Ślady te są zawarte w mających 3,8 miliarda lat skałach z zachodniej Grenlandii, wspomnianych w poprzednim rozdziale. W ciągu długiego czasu zostały one pogrążone w głębszych strefach skorupy ziemskiej, podgrzane, zmetamorfizowane i ponownie wyniesione na powierzchnię Ziemi. Ich pierwotne cechy uległy prawie zupełnemu zatarciu. Skały te nie zawierają wyraźnych skamieniałości. Zawierają jednak znaczne ilości grafitu - czystego węgla stanowiącego podstawę życia, a także zwykłego ołówka. Oczywiście, możliwe, że węgiel ten jest pochodzenia nieorganicznego, lecz bardziej prawdopodobne wydaje się, że to rodzaj chemicznej skamieniałości, jakiś relikwyt związków organicznych wytworzonych przez organizmy. Jego występowanie na Grenlandii nie należy do wyjątków; grafit pojawia się również w skałach archaiku innych części świata.

Lecz nawet 3,8 miliarda lat temu to ponad 700 milionów lat od momentu powstania Ziemi. W ciągu ostatnich 700 milionów lat ziemskiej historii zaszła praktycznie cała ewolucja życia - od jednokomórkowych organizmów do wielorybów, kangurów i człowieka. Wielu naukowców uważa, że wszystkie etapy konieczne dla narodzin życia - powstanie prostych cząsteczek organicznych ze składników występujących we wczesnych oceanach i atmosferze, polimeryzacja tych cząsteczek i reakcje między nimi, prowadzące do form bardziej złożonych, a w końcu rozpoczęcie replikacji - mogły zajść w ciągu stosunkowo krótkiego czasu, liczonego być może 10 lub nawet mniej milionów lat. Jeśli tak było naprawdę, to dlaczego nie ma wcześniejszych śladów życia? Czy naprawdę musiał upłynąć prawie miliard lat, by ono powstało?

Jak już zauważyliśmy, wcześniej, najstarsze ziemskie skały uległy w swej długiej historii takiemu podgrzaniu i sfałdowaniu, że większość śladów ich pierwotnej postaci została zatarta; być może nie zachowały się żadne ślady życia. Istnieje jednak powód, aby sądzić, że życie tworzyło się powoli. Ma to związek z tym, że młoda Ziemia była bombardowana przez obiekty nadciągające z przestrzeni kosmicznej.

Choć dziesiątki tysięcy małych meteorytów spadają na kontynenty każdego roku, czasami uderza w Ziemię znacznie większe ciała. Krater meteorytowy w Arizonie, mający około 1,6 kilometra średnicy, został utworzony przez średnich rozmiarów meteoryt, który spadł na Ziemię mniej więcej 50 tysięcy lat temu; przy dobrej pogodzie krater ten stanowi dziś spektakularny widok dla pasażerów samolotów lecących do lub z Kalifornii. W 1908 roku zderzające się z Ziemią ciało, być może mała kometa, eksplodowało nad niedostępnymi częściami Syberii, kładąc pokotem las i wywołując falę uderzeniową, zanotowaną w Europie Zachodniej na sejsmogramach oddalonych o tysiące kilometrów. Łatwo sobie wyobrazić, że w czasie wczesnych dziejów Ziemi liczba naturalnych okruchów w przestrzeni kosmicznej musiała być znacznie większa. Nasza planeta po-



wstała przecież *przez* nagromadzenie materii na orbicie wokół Słońca i nawet po osiągnięciu przez Ziemię obecnych rozmiarów, niewątpliwie w okolicy pozostało wiele materiału, który mógł się z nią zderzać. Mimo na pozór dość oczywistego rozumowania, dopiero po uzyskaniu namacalnych dowodów dostarczonych przez misję *Apollo* z Księżyca, geolodzy zaczęli doceniać, jak ważną rolę odgrywały zderzenia. Efektowne zdjęcia fragmentów komety Shoemaker-Levy 9, uderzającej latem 1994 roku w Jowisza i wywołującej zaburzenia na obszarze tej planety, tak dużym jak cała Ziemia, podkreślają tylko ich znaczenie.

Księżyc, nawet oglądany przez dobrą lornetkę, ma „dziobatą” powierzchnię. Kiedyś sądzono, że to wynik wulkanizmu, lecz dziś wiemy, że w większości są to konsekwencje zderzeń. Kratery na powierzchni Księżyca osiągają rozmiary od tysiąca kilometrów średnicy i więcej w wypadku wielkich, kolistych basenów tworzących ciemno zabarwione morza (nazwane błędnie, jak się okazało, łacińskim słowem *mare*, oznaczającym morze) do mikroskopijnych zagłębień stwierdzonych na skałach przywiezionych przez astronautów. Jednym z wielu ważnych rezultatów badań Księżyca było określenie tempa powstawania tych kraterów. Nikogo nie zaskoczyło, że było ono znacznie większe w czasie jego wczesnej historii niż dzisiaj. Największe kratery, te zajmowane dziś przez morza, są najstarsze. Jak dramatycz-

nie spowolniło się tempo zderzeń z biegiem lat, ilustruje rycina 3.1.

Księżyc jest małą planetą, która szybko ostygła i pozostaje geologicznie spokojna od miliardów lat. Nie ma na nim wulkanów i trzęsień ziemi; nie ma także atmosfery powodującej wietrzenie i erozję. Inaczej niż na Ziemi, nie zachodzą tam już żadne procesy geologiczne, które by usuwały zapis skalny;

w rezultacie Księżyc zachował większość śladów swojej *wczesnej* historii. Na ich podstawie oceniamy, że powstał mniej więcej w tym samym czasie co Ziemia i że praktycznie wszystkie skały księżycowe, starsze niż około 3,9 miliarda lat, oraz wiele młodszych, zostały silnie zmienione przez gwałtowne procesy towarzyszące zderzeniom. Najstarsze części księżycowej powierzchni są całkowicie pokryte kraterami zderzeniowymi. Jeśli ekstrapolujemy krzywą z ryciny 3.1 na wczesną historię Księżyca, to okaże się, że nasz najbliższy sąsiad podlegał nieustannemu bombardowaniu z przestrzeni kosmicznej. Skoro Księżyc był bombardowany przez spadające ciała, sąsiednia Ziemia, 0 wielokrotnie większej sile przyciągania grawitacyjnego, musiała doznawać jeszcze częstszych zderzeń.

Jakie byłyby tego konsekwencje dla wczesnych form życia, które właśnie pojawiło się na Ziemi? Hipotetyczne olbrzymie pociski uderzające w naszą planetę to wytwór fantastyki naukowej, lecz w rzeczywistości mogło się to powtarzać wielokrotnie w ciągu pierwszych kilkuset milionów lat ziemskiej historii. Zderzające się z Ziemią ciało o średnicy około 400 kilometrów, czyli rozmiarów niektórych największych planetoid występujących dzisiaj, wyparowałoby i spowodowałoby wyparowanie znacznej części ziemskiej powierzchni, wyrzucając w atmosferę gigantyczną fontannę stopionej skały. Niektóre z tych odłamków uleciałyby w przestrzeń kosmiczną, lecz większość została rozprzestrzeniona po całym globie, podgrzewając atmosferę i skały na powierzchni do bardzo wysokiej temperatury.

Wydało się, że cały ówczesny ocean mógłby wyparować pod wpływem silnego gorąca. Ogromne ilości pary wodnej dostarczone do atmosfery musiałyby radykalnie spowolnić proces ochładzania po zderzeniu, ponieważ woda odgrywa jeszcze większą rolę w powstawaniu efektu cieplarnianego niż dwutlenek węgla. Powierzchnia Ziemi uległaby wyjąłowieniu, a wszelkie istniejące przed zderzeniem prymitywne formy życia zostałyby bez wątpienia unicestwione.

Nawet znacznie mniejsze zderzenia miałyby dramatyczne konsekwencje. Basen Imbrium, najbardziej rzucająca się w oczy cecha powierzchni Księżyca, został utworzony przez cia-

ło o średnicy około 100 kilometrów. Jest on częściowo otoczony pierścieniem gór, o średniej wysokości 5 kilometrów; miejsce lądowania statku *Apollo 15* znajdowało się u stóp Apeninów księżycowych, które stanowią część tego pierścienia. Próbkę przywiezione przez astronautów *Apollo*, a także inne świadectwa wskazują, że Apeniny księżycowe nie przypominają żadnych grzbietów górskich na Ziemi. To po prostu stos rumoszu - część gruzu wyrzuconego na zewnątrz w momencie zderzenia, które utworzyło basen Imbrium. Odpowiadająca mu kolizja na Ziemi spowodowałaby wyparowanie skały, stworzyła ogromny krater, wywołała gigantyczne fale morskie, rozgrzała atmosferę i przypuszczalnie doprowadziła do wyparowania przynajmniej górnej warstwy oceanów. Życie na lądzie lub w górnych warstwach oceanu uległoby zagładzie.

Poza ciałem, które spowodowało powstanie basenu Imbrium, co najmniej jeden obiekt o średnicy około 100 kilometrów musiał uderzyć w Księżyc podczas pierwszych 600-700 milionów lat jego istnienia. Jest więc wielce prawdopodobne, że w tym samym okresie w Ziemię uderzyło więcej, a może i większych ciał. Daje to podstawę do interesującej hipotezy, że żywe organizmy mogły powstać na Ziemi z prostych cząsteczek organicznych więcej niż jeden raz i że zostały one zniszczone w wyniku gigantycznych zderzeń. Chemicy i biolodzy mają duże trudności, próbując zrekonstruować etapy powstania życia w spokojnym sro-

dowisku. Z uwagi na gwałtowne epizody, prawie na pewno okresowo występujące na wczesnej Ziemi, nie dziwi, że proces powstawania życia był powolny i sporadyczny.

Duże i częste kolizje mogą rozwiązać inną zagadkę. W poprzednim rozdziale odnotowaliśmy, że jeśli nawet Słońce ewoluowało w ten sam sposób jak większość gwiazd o jego masie, to jednak początkowo było zbyt słabe, aby ogrzewając Ziemię, zapobiec jej zamrożeniu. Jak to wynika z obliczeń, trudno byłoby rozmrozić raz zamrożoną Ziemię, nawet gdyby Słońce stało się gorętsze. Duże zderzenia mogłyby jednak powodować okresowe odmarzanie, zapobiegając stałemu głębokiemu zamrożeniu, nim ilość emitowanej energii słonecznej wzrosłaby do dzisiejszej wartości.

### Najstarsze skamieniałości

Najstarsze skamieniałości liczą 3,5 miliarda lat. Znalaziono je w skałach osadowych północno-zachodniej Australii; są to mikroskopijne jednokomórkowe organizmy przypominające bakterie, bardzo podobne do żyjącej dziś grupy cyjanobakterii. Jak przedstawiono na rycinie 3.2, te nitkowate skamieniałości utworzone są z wielu połączonych *razem* komórek. Skały, w których występują, są drobnowarstwowanymi osadami zbudowanymi głównie z czertów (drobnoziarnista krzemionka, czyli  $\text{SiO}_2$ ), które, jak się przypuszcza, osadzały się w wodach płytkich, przypuszczalnie w lagunie. Skamieniałości te, choć bardzo proste, wykazują znaczne różnicowanie morfologiczne, co sugeruje, że organizmy takie mogły powstać na Ziemi na długo przedtem, zanim odłożone zostały osady, w których występują.

Bakterie były niekwestiowanymi panami archaiku. Od momentu ich pojawienia się aż do końca archaiku, czyli miliard lat później, nie znaleziono innych rodzajów skamieniałości. Jak dobrze wiemy, bakterie są ciągle z nami, zajmując dzisiaj na Ziemi każdą możliwą niszę. Towarzyszą nam w chorobie i zdrowiu, powodują infekcje, ale i fermentację wina. Trudno wyobrazić sobie świat bez bakterii.

Bakterie są jednokomórkowymi organizmami, lecz ich komórki nie zawierają jądra ani niektórych innych struktur wewnętrznych, charakterystycznych dla późniejszych, bardziej zaawansowanych form życia. We współczesnym świecie niektóre bakterie wykorzystują energię słoneczną do fotosyntezy, w efekcie której produkują tlen. Inne, w celu wzrostu i reprodukcji, używają zupełnie odmiennych reakcji chemicznych. Ważnym, lecz kontrowersyjnym problemem jest ustalenie czasu powstania organizmów fotosyntetyzujących. Ma to bezpośredni związek z ewolucją atmosfery od wczesnego etapu,

gdy była ona zdominowana przez dwutlenek węgla, aż do jakiejś formy zbliżonej do dzisiejszej, bogatej w tlen, dzięki któremu oddychamy. Znacznie większe szczątki żywych organizmów, łatwe do zaobserwowania gołym okiem, pojawiają się w skałach, które są prawie o 100 milionów lat młodsze od tych, które zawierają pierwsze mikroskopijne skamieniałości. Są to przedziwne bulwiaste struktury, przypominające nieco bardzo duże, warstwowane głowy kapusty; osiągają nawet kilka metrów wysokości. Jednak ich wygląd jest mylący. Owe obiekty, zwane stromatolitami, nie są wcale pojedynczymi organizmami, lecz w zasadzie koloniami. Zbudowane zostały przez komórki cyjanobakterii (sinic) zbliżonych do najwcześniejszych znanych skamieniałości.

Kopalne stromatolity stają się coraz liczniejsze w młodszych skałach i w końcu archaiku, a w następującym po nim protero-zoiku są całkiem częste i dość okazałe. Ich przedziwny kształt jest rezultatem tego, że tworzą je leżące jedna nad drugą „maty” bakteryjne, które pomiędzy swoimi lepкими, długimi nitkami wychwytyją piasek i niektóre inne cząstki osadu. Chociaż stromatolity są jednymi z najwcześniejszych skamieniałości, to również dzisiaj występują jako kolonie żywych organizmów, nie tak już szeroko rozprzeszczerzone jak w proterozoiku. Ponieważ dziś znajdujemy je w płytkich wodach środowisk tropikalnych, można sądzić, że te, które są znajdowane jako skamieniałości w skałach archaiku, powstawały w przybrzeżnych regionach archaicznych kontynentów.

Kolonie sinic, budujące dzisiejsze stromatolity, są organizmami fotosyntetyzującymi. Choć nie dowodzi to, że ich odpowiedniki z archaiku były również organizmami fotosyntetyzującymi, świadczy jednak o tym, że fotosynteza mogła zachodzić na Ziemi już około 3,5 miliarda lat temu. Niemniej jest bardzo mało dowodów na to, że atmosfera zawierała dużo tlenu, nawet przy końcu archaiku. Jak przekonamy się w następnym rozdziale, sytuacja ta zaczęła się zmieniać z początkiem prote-rozoiku.

## ROZDZIAŁ 4

### PROTEROZOIK

Proterozoik, podobnie jak archaik, trwał prawie dwa miliardy lat. Wraz z jego końcem przeminęło dziewięć dziesiątych ziemskiej historii, liczącej 4,5 miliarda lat. Choć wiemy *znacznie* więcej o proterozoiku niż o archaiku, to pochodzący z niego zapis jest również bardzo niekompletny, szczególnie jeśli chodzi o początek. Skały proterozoiku są jednak stosunkowo liczne w porównaniu z ich archaicznymi odpowiednikami. Wiemy dzięki nim, że często występowały stromatolity, że wzrosła zawartość tlenu w atmosferze i że powstawały i były niszczone grzbiety górskie, podobnie jak to się dzieje dzisiaj. Mamy nawet nieco danych o klimacie proterozoiku. Jakie świadectwa dostarczają nam takich informacji? Jest to, być może, dobry moment, aby za pomocą przykładów z proterozoiku przyjrzeć się sposobom, dzięki którym geolodzy odczytują zapis w skałach.

Fundamentalną zasadą nauk o Ziemi jest uniformitaryzm. W podręcznikach często pada zdanie: „Terazniejszość jest kluczem do przeszłości”. Tak naprawdę w zasadzie tej nie ma nic nadzwyczajnego, jeśli chodzi o nauki o Ziemi; podkreśla ona tylko to, że procesy geologiczne podlegają tym samym prawom fizyki i chemii i można je opisać takimi samymi formułami matematycznymi, jak wszystko w przyrodzie. Jeśli w piaskowcu mającym 300 milionów lat znajdziemy zmarszczki podobne do

powstających dziś w piasku (na osłonięte) pluty, oznacza to, że najprawdopodobniej osadzał się on w takich właśnie warunkach. Choć zasada uniformitaryzmu może wydawać się oczywista, idea ta w swoim czasie była rewolucyjna. Po raz pierwszy zastosowana została w naukach o Ziemi przez szkockiego geologa Jamesa Huttona. Idea ta ma swoich przeciwników, lecz jeśli korzystać z niej rozsądnie i w zastosowaniu do długich odcinków czasu - dobrze służy geologii. Nawet przypadki tak rzadkie i katastrofalne z ludzkiego punktu widzenia, jak zdarzająca się raz na stulecie wielka powódź, niszczące trzęsienie ziemi lub uderzenie wielkiego meteorytu, są tak naprawdę zdarzeniami regularnymi, okresowymi i do pewnego stopnia przewidywalnymi, biorąc pod uwagę geologiczną skalę czasu.

Dowiedzieliśmy się, że najwcześniejsza atmosfera była bogata w CO<sub>2</sub> i że nawet pod koniec archaiku zawierała prawdopodobnie bardzo mało tlenu. Lecz skały proterozoiku opowiadają nam zupełnie inną fascynującą historię. Dokładne badania

tych skał, uwzględniające zasadę uniformitaryzmu, pozwalają geologom odtworzyć przynajmniej niektóre etapy rozwoju prowadzące do atmosfery dzisiejszego typu.

## Ewolucja atmosfery

Zawarte w skałach proterozoiku wskazówki na temat zmieniającego się składu atmosfery sugerują, że w czasie tej ery nastąpił gwałtowny wzrost ilości tlenu. Wiemy, że jego dzisiejsza zawartość wynosi około 21% objętości atmosfery i jest utrzymywana w wyniku fotosyntezy roślin. Jest jasne, że zmiany zawartości tlenu w atmosferze były w przeszłości nierozdzielnie związane z historią życia na Ziemi. Poniżej przyjrzymy się niektórym interesującym i nieoczekiwanym konsekwencjom zmian zawartości tlenu w atmosferze. Jedną z nich jest powstanie rud żelaza używanych w naszych hutach.

Cechą szczególną niektórych wczesnoproterozoicznych skał osadowych, mających ponad dwa miliardy lat, jest to, że zawierają minerał, zwany pirytem (znany także jako „złoto głup-

ców”), i uraninit. Pod względem chemicznym piryt jest siarczkiem żelaza o wzorze  $\text{FeS}_2$ , a uraninit, jak można się domyślać, związkami uranu. W pewnych miejscach na świecie zawartość uraninitu w skałach proterozoicznych jest tak duża, że wydobywa się go jako rudę uranu. Występowanie tych dwóch minerałów samo w sobie nie jest niczym szczególnym - pojawiają się one również w skałach innych okresów geologicznych. To, co wyróżnia wczesnoproterozoiczny piryt i uraninit, to jego obecność w osadach, które pierwotnie powstały w takich środowiskach, jak koryta rzek i plaże. Dokładne badania pokazują, że minerały te występują jako ziarna detrytyczne - wyero-dowane z jakiejś skały macierzystej i przeniesione do miejsca depozycji przez płynącą wodę. Ani uraninit, ani piryt nie występują jednak w takich środowiskach obecnie, ponieważ są one niestabilne w obecności tlenu. Ulegają wtedy bardzo szybko utlenieniu i rozpadają się. Podobnie jak dzisiaj, rzeki i strumienie transportujące owe ziarna mineralne w proterozoiku pozostawały w kontakcie z atmosferą. Uniformitaryzm sugeruje więc, że wczesny proterozoik różnił się czymś od dnia dzisiejszego; oczywistą odpowiedzią jest, że atmosfera zawierała tak mało tlenu, iż zarówno uraninit, jak i piryt mogły przetrwać jako ziarna detrytyczne, nie utleniając się. Minerały te nie występują w osadach rzecznych mających mniej niż około 2 miliardów lat, a zatem świadczą o tym, że zawartość tlenu w atmosferze zaczęła rosnąć w tym mniej więcej czasie.

Choć jest to przypuszczalnie nieprawdopodobne, nie można wykluczyć, że ziarna uraninitu i piryty nie zostały utlenione w wyniku jakiegoś nie znanego mechanizmu. Istnieją jednak w skałach proterozoiku co najmniej dwie inne wskazówki, że mniej więcej dwa miliardy lat temu atmosferę charakteryzowała

niska zawartość tlenu. Jedną z nich związana jest z wydobyciem *żelaza*.

Większość światowej rudy *żelaza* pochodzi z osadów, znanych jako żelaziste formacje wstęgowe, w skrócie BIF (*Banded Iron Formations*). Ruda występuje w skałach osadowych, a osady zawdzięczają prążki naprzemiennemu występowaniu warstewek bogatych w żelazo lub krzemionkę. Bogate w *żelazo*

są znacznie ciemniejsze od bogatych w krzemionkę, co nadaje osadom ich charakterystyczny prążkowany wygląd. Większość światowych BIF pochodzi z wczesnego proterozoiku, obejmującego okres ponad 1,8 miliarda lat.

Zrozumienie znaczenia BIF jako wskaźników zawartości tlenu w atmosferze wymaga nieco wiedzy na temat chemicznych właściwości *żelaza*, które są zależne od ilości tlenu w jego otoczeniu. Żelazo, o czym wie każdy właściciel samochodu, bardzo szybko łączy się z tlenem, tworząc rdzę. W zwykłych skałach skorupy ziemskiej *żelazo* nie występuje w formie metalicznej. Istnieje raczej w jednym z dwóch stanów walen-cyjnych (zwanym także stopniem utlenienia): jest to albo  $Fe^{2+}$ , albo  $Fe^{3+}$ , które połączone z innymi pierwiastkami tworzą typowe minerały, pospolicie występujące w skałach. W skałach metamorficznych, których większość powstaje w wyniku przetopienia płaszcza, *żelazo* ma zwykle niższy stopień utlenienia -  $Fe^{2+}$ . Kiedy jednak skały te ulegają wietrzeniu przy współudziale wody deszczowej, część tego żelaza się rozpuszcza, a wysoka zawartość tlenu w atmosferze powoduje bardzo szybkie jego utlenienie do  $Fe^{3+}$ . Lecz  $Fe^{3+}$  jest prawie nierozpuszczalne i w rezultacie żelazo bardzo szybko wytrąca się jako drobnoziarnista, przypominająca rdzę, substancja pozostawiająca czerwone naloty na dnach strumieni i w innych miejscach, gdzie ulega nagromadzeniu. Dlatego naturalne wody na Ziemi zawierają dzisiaj bardzo mało *żelaza* w formie rozpuszczonej. Byłoby inaczej, gdyby zawartość tlenu w atmosferze okazała się *znacznie* niższa:  $Fe^{2+}$  nie ulegałoby utlenieniu i te same wody mogłyby zawierać znacznie więcej rozpuszczonego *żelaza*, gdyż  $Fe^{2+}$  jest znacznie łatwiej rozpuszczalne niż  $Fe^{3+}$ .

Osady BIF odkładane były w wodzie, a sytuacją geologiczną większości z nich sugeruje, że powstały w morzach dość blisko lądów, choć na różnych głębokościach. *Żelazo* w tych osadach występuje w formie utlenionej, czyli jako  $Fe^{3+}$  wytrącone z kolumny wody. Ponieważ istnieją dowody na to, że w czasie tworzenia się tych osadów zawartość tlenu w atmosferze była ciągle mała, wyciągnięto wniosek, iż tlen niezbędny w tym procesie był produkowany przez fotosyntetyzujące glony, żyją-

ce w powierzchniowych warstwach mórz. Ważną kwestią, wiążącą się ze składem atmosfery, jest pytanie: w jaki sposób ogromne ilości *żelaza* występujące w tych osadach zostały przetransportowane do miejsca złożenia? Jak to wynika z po-

przednich rozważań, w dzisiejszych warunkach bardzo mała ilość żelaza wypłukanego ze skał jest znoszona do oceanów. Miałoby to miejsce szybko, gdyby ono utleniało i wytrącało w postaci tlenków żelaza. To samo się dzieje z żelazem wypłukanym ze skał bazaltowych dna morskiego przez gorące wody podmorskich źródeł. Ponownie sugeruję, że we wczesnym proterozoiku istniały odmiennie warunki. Niska zawartość tlenu w atmosferze pozwalała na transport dość dużych ilości  $Fe^{2+}$ . W momencie kiedy to żelazo napotykało strefy morskich wód powierzchniowych, które w wyniku działalności fotosyntetyzujących glonów były stosunkowo dobrze nasycone tlenem, ulegało wytrąceniu z roztworu jako tlenek żelaza. Ponieważ większość znanych nam żelazistych formacji wstęgowych jest ograniczona do części czasu geologicznego sprzed około 1,8 miliarda lat, wynika stąd, że od tego momentu zawartość tlenu w atmosferze była tak wysoka, iż duże ilości rozpuszczonego żelaza nie mogły być transportowane.

Trzecie świadectwo dotyczące zawartości tlenu w atmosferze jest także związane z utlenianiem żelaza. Nagromadzenia osadów mających wyraźne czerwone zabarwienie (zwykle są to piaskowce) zdarza się dość często w zapisie geologicznym. Nie zaskakuje więc, że geolodzy opisują te skały jako skały o czerwonym zabarwieniu, czyli red beds. Zabarcenie jest wywołane obecnością drobnoziarnistego, utlenionego żelaza pod postacią minerału hematytu, zwykle pokrywającego, a czasami cementującego poszczególne ziarna piaskowca. Red beds są często wydobywane jako kamień budowlany, co może poświadczyć każdy, kto widział Czerwony Fort w Starym Delhi czy katedry w Chester lub Carlisle w północno-zachodniej Anglii. Nie znamy skał tego typu liczących więcej niż 2,2-2,3 miliarda lat, przypuszczalnie dlatego, że wcześniej nie było w atmosferze wystarczającej ilości tlenu, aby mógł powstać hematytowy cement. Ponownie trzeba zaznaczyć, że mogą być

inne powody braku red beds. Niektórzy geolodzy na przykład zwrócili uwagę na to, że środowiska, w których takie skały powstają, były zapewne rzadkie w archaiku i wczesnym proterozoiku. Wiele z tych skał zbudowanych jest z osadów lądowych, odkładanych we wnętrzach wielkich kontynentów w suchym klimacie, a małe kontynenty, typowe dla wcześniejszych części zapisu geologicznego, mogły nie sprzyjać powstawaniu takich osadów. Istnieją jednak osady liczące ponad dwa miliardy lat, które utworzyły się przypuszczalnie w warunkach, które dzisiaj dawałyby skały o czerwonym zabarwieniu, a jednak nie są one scementowane hematytem. To ważne świadectwo wskazuje na obecność tlenu w atmosferze jako czynnika sprzyjającego ich występowaniu.

Tak więc nawet niedoskonały zapis geologiczny proterozoiku dostarcza nam dużo wiedzy na temat dróg ewolucji ziemskiej atmosfery. Zgodnie z nim około dwóch miliardów lat temu, z



dokładnością do kilkuset milionów, nastąpił w niej wyraźny wzrost zawartości tlenu. Od tego momentu ziarna uraninitu i pirytu nie mogły już gromadzić się jako ziarna detrytyczne w rzekach i piaskach plażowych, ulegały bowiem utlenieniu i rozpadowi. Żelazo wypłukane ze skał lądowych i dna morskiego szybko się utleniało i wytracało, a jego ogromne ilości, konieczne do powstania żelazistych formacji wstęgowych, nie mogły być już transportowane do morza lub nawet w jego obrębie. Z tego samego powodu hematyt mógł się wytracać w piaskowcach z wód międzyziarnowych, tworząc otoczki i cement oraz powodując powstanie *red beds*, szeroko rozprzestrzenionych w ciągu reszty zapisu geologicznego. Choć pojedyncze wskazówki nie są nigdy jednoznaczne, wszystkie te świadectwa razem stanowią przekonujące dowody. Geolodzy niczym detektywi nagromadzili na pozór różne informacje, które łącznie ukazują, ponad wszelkie uzasadnione wątpliwości, szczegóły zdarzeń sprzed ponad dwóch miliardów lat! Chociaż skamieniałości w skałach proterozoiku są dość rzadkie, potwierdzają one wnioski dotyczące zawartości tlenu w atmosferze osiągnięte na podstawie innych dowodów. Nie tylko świadczą o tym, że dopiero w późnym proterozoiku rozwinęły

się złożone wielokomórkowe organizmy, lecz również potwierdzają wcześniejsze znaczenie stromatolitów. Współczesne stromatolity powstają w tropikalnych strefach międzyrzecznych i są w zasadzie tworzone przez kolonie fotosyntetyzujących glonów\* produkujących tlen. Jest całkowicie prawdopodobne, że to właśnie płytkie przybrzeżne lub śródlądowe morza, które powstały w późnym archaiku i wczesnym proterozoiku na stosunkowo dużych kontynentach, dostarczyły środowisk sprzyjających rozkwitowi stromatolitów, powodując znaczne zwiększenie tempa wytwarzania tlenu. Ponieważ jest on jednak bardzo reaktywną substancją, większość wolnego tlenu powstałego początkowo w wyniku fotosyntezy została szybko zużyta w reakcjach chemicznych, w wyniku których składniki zarówno skał na powierzchni, jak i atmosfery uległy utlenieniu. W końcu jednak, w miarę wzrastania tempa fotosyntezy, tlen zaczął się gromadzić w atmosferze.

## **Klimat proterozoiku**

W zapisie skalnym niewiele istnieje świadectw dotyczących klimatu proterozoiku... Większość informacji na temat klimatu bliższej nam historii geologicznej pochodzi ze skamieniałości, ponieważ wiemy sporo o typach środowisk, w których żyło wiele kopalnych organizmów. Rzadkie skamieniałości proterozoiku, głównie jednokomórkowe bakterie, dostarczają mało świadectw w tym zakresie. Jednakże skały zawierają najstarsze ślady zlodowacenia, mającego przypuszczalnie charakter globalnej epoki lodowej.

Wniosek, że niektóre typy skał osadowych są rezultatem działalności lodowców, wynika z zasady uniformitaryzmu - osady związane z dzisiejszymi lodowcami są dobrze znane, a niektóre ich cechy bardzo charakterystyczne. W liczących 2,3 miliarda lat skałach występujących w pobliżu jeziora Hu-ron w Kanadzie stwierdzono cienkie warstewki drobnoziarni-

stego osady przypominające warwy, które są rocznymi przyrostami osadów złożonych w jeziorach lodowcowych. Dzisiejsze warwy składają się zwykle z dwu warstewko wyc h cykli rocznych, w których jedna warstewka odpowiada szybkiemu topnieniu lodu i transportowi osadu w sezonie letnim, a druga, bardziej drobnoziarnista, jest odpowiednikiem powolniejszej sedymentacji zimowej. Choć nie jest łatwo zidentyfikować takie szczegóły w przypadku proterozoiku, obserwowane warstewki są prawie na pewno warwami glacialnymi. Owe drobnoziarniste warstwowane osady zawierają czasami nawet duże kamienie lub inaczej „dropstony”, charakterystyczne dla środowisk lodowcowych, w których gruby materiał jest czasami przenoszony przez pływający lód i zrzucany z dala od źródła, dostając się do drobnoziarnistego osadu. Osady lodowcowe, mniej więcej tego samego wieku jak w Kanadzie, stwierdzono w innych częściach Ameryki Północnej oraz w Afryce, Indiach i Europie. Wskazuje to na globalny charakter zlodowacenia i na to, że przez pewien okres we wczesnym proterozoiku (dokładny czas nie jest znany) Ziemia znajdowała się w okowach lodowców.

Choć istnieje wiele obszarów skorupy ziemskiej, zbudowanych ze skał mających więcej niż 2,3 miliarda lat, żaden z nich nie dostarcza wyraźnych dowodów na istnienie wcześniejszych zlodowaceń. Nie oznacza to, że się one nie zdarzyły, ponieważ zapis jest pełen luk, a większość starszych skał uległa silnej metamorfizacji, co czyni ich historię trudną do odczytania. Niemniej istniejące dowody sugerują, że zlodowacenie sprzed 2,3 miliarda lat było jednym z pierwszych znaczących okresów głębokiego zamarznięcia, jakiego doświadczyła Ziemia - przynajmniej w zachowanym zapisie kopalnym, czyli poczynając od około 2,9 miliarda lat temu. (Wspomniana w rozdziale 2 możliwość zamarznięcia oceanów jest zdarzeniem na zupełnie inną skalę i wynika z innych czynników niż rozważane tu zlodowacenia. Jeśli w ogóle to zamarznięcie nastąpiło, to na długo przed powstaniem zapisu skalnego). Po tym wczesnoprote-rozoicznym zlodowaceniu klimat był, jak się zdaje, przez długi okres dość łagodny, nie ma także świadectw zlodowaceń w cią-

gu następnych 1,5 miliarda lat. Potem nagle zapis skalny pokazuje serię epizodów glacialnych pod koniec ery

proterozoicznej: 850-600 milionów lat temu. Owe okresy zlodowaceń były zjawiskami globalnymi, ponieważ wszystkie współczesne kontynenty (być może z wyjątkiem Antarktydy, której większość jest dziś pogrzebana pod lodem i niedostępna dla badaczy) mają pochodzące z tego okresu ślady zlodowacenia. Chociaż położenie kontynentów w późnym proterozoiku było zupełnie inne niż dzisiaj, to szerokie rozprzestrzenienie dowodów zlodowacenia świadczy, że planeta mogła być dość chłodna, nawet w niskich szerokościach geograficznych. Zimowe wakacje w późno-proterozoicznym odpowiedniku Karaibów nie byłyby zapewne wielką uciechą.

## Ewolucja kontynentów

A jak wyglądały kontynenty w proterozoiku? Powiedzieliśmy wcześniej, że we wczesnym archaiku były one przeważnie małe i przypuszczalnie nie bardzo przypominały swoje dzisiejsze odpowiedniki. W końcu archaiku istniały już większe kontynenty, a pod koniec proterozoiku ich rozmiary i charakter upodobały je do dzisiejszych kontynentów. Istnieją liczne dowody powiększania się kontynentów w czasie długiej części proterozoiku i świadczą one o tym, że proces ten nie różnił się zbyt od dzisiejszego. Jednym z najlepiej udokumentowanych przykładów powiększania się kontynentów jest obszar północnej Kanady, zbadany przez Paula Hoffmana z Kanadyjskiej Służby Geologicznej.

Hoffman spędził wiele sezonów letnich, badając skały odsłaniające się na Terytoriach Północno-Zachodnich. Na rozległych obszarach otaczających krąg polarny i rozciągających się od północnych wybrzeży kontynentalnej Kanady do Wielkiego Jeziora Niewolniczego na południu rozpoznał on pozostałości proterozoicznych cykli erozji, sedymentacji i tworzenia się gór (ryc. 4.2). Proterozoiczne góry są już od dawna zniszczone przez erozję, a dzisiejszy krajobraz - łagodny, choć niegościnn-

ny. Pomimo to jest przejmująco i swoiście piękny, a co najlepsze dla geologa - bardzo słabo pokryty roślinnością. Skały są nagie i odsłonięte, gotowe opowiedzieć swoją historię.

Lecz jak można, na podstawie badania zwykłych skał, opowiedzieć historię, która wydarzyła się ponad dwa miliardy lat temu? Jak się to robi - zobaczyliśmy w przybliżeniu w rozdziale poświęconym zawartości tlenu w atmosferze - rzetelne przedstawienie sprawy wymagałoby jednak całej książki. Interpretacja świadectw wymaga głębokiej znajomości geologii oraz dużego doświadczenia w badaniach skał w terenie. Niektóre podstawowe elementy badań są jednak dość proste i w *rzeczy-*

wiśłości sprowadzają się do zdrowego rozsądku. Jako przykład weźmy czas. Więcej na ten temat powiemy później, lecz jest dość oczywiste, że czas, szczególnie wiek skał i tempo różnych procesów geologicznych, ma zasadnicze znaczenie w zrozumieniu historii geologicznej regionu. I co najmniej czas względny - to znaczy odpowiedź na pytanie, czy skała lub formacja skalna jest starsza, czy młodsza niż jej otoczenie - można odczytać w prosty sposób. W sekwencji osadów na przykład najstarsze leżą zwykle u podstawy, a najmłodsze na górze. W innych skałach kluczem bywa wzajemne przecinanie się: jeśli ciało magmowe lub uskok przecina inną formację skalną, to przecięcie to jest od niej młodsze. Przykłady mogą się wydawać trywialne, lecz takie właśnie rozumowanie pozwala często stwierdzić wiek względny i wzajemne relacje nawet w bardzo złożonych sytuacjach (ryc. 4.1). Tylko po wykonaniu tego zadania możliwa jest rekonstrukcja rzeczywistych zdarzeń geologicznych i ich właściwego następstwa.

Jeśli chodzi o skały proterozoiczne w północnej Kanadzie, Hoffman stwierdził, że badany przez niego region był wczesnym proterozoiku krawędzią kontynentu, dostarczającą do morza osady bogate w kwarc (ryc. 4.2). Piasek kwarcowy jest dobrym wskaźnikiem kontynentów; w wyniku wietrzenia granitu, typowej skały skorupy kontynentalnej, powstaje mnóstwo kwarcu. Większość innych minerałów występująca w granicie rozpuszcza się lub zostaje przekształcona w coś innego, na przykład w il. Białe piaski wysp tropikalnych (większość

z nich to wulkany otoczone rafami koralowymi, które mają zupełnie inny skład niż kontynenty) mogą wyglądać jak plaże Kalifornii lub Hiszpanii, lecz składają się z odłamków koralu, a nie kwarcu. Bogate w kwarc piaskowce proterozoiczne opisane przez Hoffmana świadczą o tym, że osady kontynentalne pochodziły ze wschodu oraz że ocean leżał na zachodzie - przynajmniej w dzisiejszym układzie geograficznym. Rzeczywiste położenie kontynentów proterozoiku mogło być zupełnie inne. W wyższej części kolumny osadów, a zatem bliższej nam w czasie, pojawiają się jednak inne osady, zawierające materiał wulkaniczny. W przeciwieństwie do piasków kwarcowych,

osady wulkaniczne przybyły z zachodu, od strony morza. Jak mogło do tego dojść? Zanim powstała teoria tektoniki płyt, zagadki takie jak ta rozwiązywano sugerując, że musiał istnieć „brakujący” obszar lądowy gdzieś dalej za morzem. Dziś przyjmujemy, że rzeczywiście istniał ląd gdzieś z dala od krawędzi kontynentu, lecz mamy dodatkowe podstawy naukowe, by uważać go za grupę wulkanów bardzo podobną do dzisiejszych Aleutów czy Marianów. Przesuwał się on w kierunku kontynentu, aby w końcu się z nim zderzyć. Dzisiaj na Terytoriach Północno-Zachodnich nie ma odpowiednika proterozoicznego oceanu; zachodnia krawędź kontynentu znajduje się w odle-

głębokości ponad 1000 km.

Nie jest to jedyny przykład. Zderzenia między masami lądowymi w czasie geologicznym, spajające je razem wzdłuż grzbietów górskich - a czasami także proces odwrotny, czyli rozpad kontynentu - doprowadziły do obecnej konfiguracji lądów i mórz. Ameryka Północna, jeden z największych kontynentów, jest obiektem typowym; pod wieloma względami przypomina gigantyczną pozszywaną koldrę złożoną z fragmentów materiału różnego pochodzenia.

Zarysowany wyżej przebieg powstawania skał Terytoriów Północno-Zachodnich - najpierw osadzanie się piaskowców wzdłuż krawędzi kontynentów z ich źródłem na wschodzie, potem osady wulkaniczne z zachodu - jest ogromnie uproszczony. W rzeczywistości skały owe zostały zmetamorfizowane, sfałdowane i poprzecinane licznymi uskokami, czyniąc rekonstrukcję ich pierwotnego położenia niezwykle trudną. Fałdowanie, poprzecinanie uskokami, i metamorfizm są prawie na pewno rezultatem kolizji bloków kontynentalnych i wulkanicznych; towarzyszy takim epizodom tworzenie się gór. Pod każdym względem - typów uskoków, typów skał metamorficznych, otaczających dawne wybrzeża, oraz typów i następstwa skał - region ten bardzo przypomina współczesne strefy kolizji i tworzenia się gór. Lecz, jak już o tym wspomniano, dziś nie ma tam gór, a jedynie łagodny krajobraz z niskimi wzniesieniami. Ponownie widzimy, że w geologicznej skali czasu Ziemia jest bardzo dynamicznym miejscem.

W obszarach górskich erozja znosi 1-1,5 metra materiału w ciągu 1000 lat. W tym tempie nawet Mount Everest zostałby zniszczony i zrównany do poziomu morza w ciągu 5-8 milionów lat. Zdarzenia jednak nie przebiegają tak prosto, ponieważ w miarę jak góra ulega erozji, a jej stoki stają się mniej strome, spowalnia się również tempo erozji. Częściowo z tego powodu Mount Everest i inne góry Himalajów pozostaną z nami (choć w znacznie łagodniejszej postaci) przez znacznie dłuższy czas, niż sugerowałoby to dzisiejsze tempo ich erozji. Lecz jeszcze ważniejsze jest to, że góry przypominają nieco statki pływające po morzach: jeśli usuniemy część ładunku, statek wynurza się nieco z wody. Podobnie, gdy w wyniku erozji usunięty zostanie materiał ze szczytu góry, skorupa ziemska „wypłynie” nieco z podległego płaszcza. Jeżeli erozja usuwa metr skały, odpowiednią Ziemi na to zredukowanie obciążenia jest wypiętrzenie i w rezultacie spadek wysokości wynosi tylko około 20 cm. Z tego powodu potrzeba przypuszczalnie 50-60 milionów lat, aby typowy, duży łańcuch górski został zrównany do poziomu morza. Nie jest to jednak ciągle szczególnie długi okres w skali geologicznej. Góry Skaliste, Alpy, Himalaje - wszystkie one w końcu znikną, lecz pozostawiają po sobie zapisaną w skałach opowieść o swoim powstaniu. Zdarzenie, które stworzyło nie istniejący dziś łańcuch górski na Terytoriach

Północno-Zachodnich Kanady, miało miejsce prawie 1,9 miliarda lat temu. Lecz było ono tylko jedną z wielu takich kolizji. 1,6 miliarda lat temu, mniej więcej w połowie proterozoiku, większość terytorium dzisiejszej Ameryki Północnej została złożona z drobniejszych fragmentów w superkontynent, nazwany przez geologów badających te skały Laurencją. Paul Hoffman, który napisał artykuł na temat tego okresu, zatytułował go *The United Plates of America (Zjednoczone Płyty Ameryk)*. Ten gigantyczny kontynent środkowego proterozoiku obejmował również Grenlandię i północne części Wysp Brytyjskich oraz fragmenty Skandynawii i północnej Rosji.

Podobny przebieg miały zdarzenia w innych częściach świata. Większość dzisiejszych kontynentów zawiera małe fragmenty skorupy archaicznej, spojone *razem* przez strefy kolizji

z innymi archaicznymi lub proterozoicznymi fragmentami. Choć ciągle tego nie udowodniono, to jednak jest możliwe, że pod koniec proterozoiku praktycznie wszystkie dzisiejsze kontynenty były połączone razem w naprawdę gigantyczny kontynent. Część świadectw pochodzi z pasa skał metamorficznych, biegnących z Labradoru we wschodniej części Ameryki Północnej do Zatoki Meksykańskiej. Skały owe mają od 1,2 do miliarda lat i noszą wspólną nazwę prowincji Grenville (ryc. 4.3). Na powierzchni odsłaniają się we wschodniej Kanadzie oraz w górach Adirondack w stanie Nowy Jork, a podpowierzchniowo występują na większości terytorium wschodnich Stanów Zjednoczonych. Skały Grenville są pozostałością ogromnego zderzenia dwóch dużych kontynentów - odpowiednika obecnej Ameryki Północnej na zachodzie i przypuszczalnie Ameryki Południowej, która była połączona z większością pozostałych kontynentów, na wschodzie. Ten mariaż Ameryki Północnej i drugiego dużego kontynentu trwał kilkaset milionów lat - aż do czasu, kiedy lądy zaczęły się znowu rozdzielać około 800 milionów lat temu, a był to ciągle proterozoik. W procesie tym pas skał Grenville pozostał u wschodniej krawędzi Ameryki Północnej. Jak przekonamy się w rozdziale 8, inny pas kontynentu został później dodany do wschodniej części Ameryki Północnej w procesie bardzo zbliżonym do tego, który stworzył prowincję Grenville. Pas ten to dzisiejsze Appalachy. Wszystkie te różne fragmenty skorupy, składające się na obecny kontynent północnoamerykański, uwidoczniono na mapie na rycinie 4.3.

W rzeczywistości tworzący się kontynent północnoamerykański prawie nie przetrwał proterozoiku jako całość. W skorupie ziemskiej w rejonie Jeziora Górnego istnieje ogromna blizna w kształcie podkowy, z dwoma ramionami skierowanymi na południe w kierunku centrum kontynentu (ryc. 4.3). To zarzucony ryft po rozdzieleniu się kontynentów, które zderzyły się 1,2-1,3 miliarda lat temu. Choć ryft ten jest dziś wypełniony, można go rozpoznać na podstawie skał w nim występujących:

są to bazalty wylewające się zwykle w miejscach rozrywania skorupy i osady typowe dla wypełnień dolin ryftowych.

W niektórych miejscach, na przykład wokół Jeziora Górnego, skały owe odsłaniają się na powierzchni, w innych występują podpowierzchniowo i stwierdza się je wyłącznie w rdzeniach wiertniczych. Ponieważ skały bazaltowe ryftu mają dużą gęstość i zawierają dużo żelaza, także lokalne pole grawitacyjne oraz namagnesowanie skał różnią się wyraźnie. Co mogło spowodować powstanie tego ogromnego ryftu, długiego na prawie 2000 kilometrów i miejscami mającego ponad 100 kilometrów szerokości, zawierającego ogromne ilości law bazaltowych? Zapewne był on wynikiem działania pioropusza gorącego materiału, unoszącego się w płaszczu ku górze, aby uderzyć w kontynent północnoamerykański. Takie zjawiska zachodzące dzisiaj pod oceanami są odpowiedzialne za wulkanizm Hawajów i Islandii. Bardziej szczegółowo omówione zostaną w następnym rozdziale. Ameryka Północna okazała się jednak zbyt sztywna, aby zdołała ją przełamać nawet pioropusz w płaszczu, i choć ma widoczną bliźnię, oparła się fragmentacji.

## Proterozoiczny świat biologiczny

Zadziwiająco mało zmian zaszło przez większość proterozoiku w biosferze, wśród istot żywych, podczas gdy całe kontynenty powstawały, zderzały się i rozdzielały. Życie biologiczne rozwijało się głównie w oceanach i przede wszystkim pod koniec proterozoiku. Nawet na początku okresu kambryjskiego kontynenty nie były jeszcze rajem dla życia. Choć mogły występować na nich glony i być może nawet niektóre prymitywne organizmy wielokomórkowe, w porównaniu z dniem dzisiejszym powierzchnia lądów była naga.

W poprzednim rozdziale dowiedzieliśmy się, że istnieją rzadkie archaiczne skamieniałości, będące organizmami jednokomórkowymi. Wydaje się, że są to bakterie i cyjanobakterie (znane również jako sinice), a więc komórki nie zawierające jądra i innych ważnych struktur wewnętrznych, charakteryzujących bardziej zaawansowane formy życia. Zostały one nazwane *Prokaryota*. Stromatolity budowane przez *Prokaryota*, jak to

zauważyliśmy, są chyba najbardziej charakterystycznymi skamieniałościami proterozoiku. *Prokaryota* były prawdopodobnie jedynymi mieszkańcami proterozoicznych mórz aż do mniej więcej połowy tej ery. Wówczas zdarzyło się coś ważnego. Następny krok w kierunku złożoności, jakim jest rozwój komórek eukariotycznych, mających różne struktury wewnętrzne, nastąpił, jak to się obecnie uważa, gdy jedna komórka prokario-tyczna pochłonięła inną, zamierzając

najprawdopodobniej ją zjeść. Pochłonięta komórka żyła jednak dalej w szczególnej symbiozie, podlegając jedynie modyfikacji. Dobrym tego przykładem jest chloroplast, czyli struktura występująca w pojedynczych komórkach eukariotycznych i u wyższych roślin; zachodzi w niej fotosynteza. Chloroplasty przypominają najbardziej nieco zmodyfikowane cyjanobakterie, czyli komórki sinic. Komórki mające wewnętrzne struktury, prawie na pewno *Eukaryota*, pojawiają się w zapisie kopalnym po raz pierwszy około 1,4 miliarda lat temu.

Co zadziwiające, nawet gdy powstały komórki eukariotyczne, nie spowodowało to gwałtownego rozwoju zwierząt wielokomórkowych. Zabrało to wiele setek milionów lat - znacznie więcej czasu niż minęło od pojawienia się na Ziemi pierwszych dinozaurów do chwili obecnej. Nieliczne skamieniałości, przypominające wielokomórkowe glony, występują w skałach liczących 1,3 miliarda lat; nie znaleziono natomiast śladów zwierząt wielokomórkowych w skałach starszych niż miliard lat. Nawet wtedy dalszy rozwój zwierząt wielokomórkowych był dość powolny, aż do chwili poprzedzającej „eksplozję kambryjską” opisaną w dalszym rozdziale. Dlaczego powstanie złożonych form życia na Ziemi pochłonęło tyle czasu? Darwin, chociaż nie zdawał sobie sprawy z ogromu czasu przed kambrem, nie potrafił znaleźć na to pytanie odpowiedzi. To ciągle pozostaje zagadką dla zajmujących się ewolucją życia. Niewątpliwie częściowe wytłumaczenie może tkwić w niedoskonałości przed-kambryjskiego zapisu kopalnego. Przed kambrem organizmy nie wytworzyły twardych, zmineralizowanych części ciała - zębów, zewnętrznych pancerzy, szkieletu - odpornych na poczynania drapieżników i stosunkowo dobrze zachowujących się

w skałach. Wszystkie przykłady prekambryjskiego życia to organizmy bezszkieletowe. Tak naprawdę aż do lat pięćdziesiątych naszego stulecia paleontolodzy, pomimo usilnych starań, nie znaleźli żadnych niekwestionowanych świadectw istnienia życia przed kambrem. Ciągłe luki w naszej wiedzy stanowią niektóre zasadnicze etapy w rozwoju wyższych stworzeń. Na pewno jednak wczesny rozwój życia był wyraźnie procesem bardzo powolnym w porównaniu z późniejszym tempem ewolucji. To jedna z wielu tajemnic, które czynią z badania ziemskiej historii tak fascynujące przedsięwzięcie.

## ROZDZIAŁ 5

### TANIEC PŁYT



Trzydzieści czy czterdzieści lat temu niektóre idee opisane >v poprzednim rozdziale, a zwłaszcza koncepcja, że kontynenty w czasie proterozoiku ulegały rozpadowi i łączeniu, wydawały się oburzające dla większości geologów. Dziś uważa się to za pewnik. Rozwój tektoniki płyt w ostatnich latach zmienił kompletnie sposób widzenia Ziemi przez geologów. Zanim przystąpimy do kontynuacji naszej podróży przez historię geologiczną, warto przyjrzeć się, w jaki sposób teoria tektoniki płyt powstała i rozwinęła się oraz jak obecnie pojmujemy ruch kontynentów na powierzchni Ziemi.

Niemal każdy, kto ogląda uważnie mapę świata z Oceanem Atlantyckim pośrodku, dostrzega, że gdyby go usunąć, wybrzeża Afryki i Ameryki Południowej dokładnie by do siebie pasowały. Choć tysiące ludzi obserwowało to od dawna, dopiero na początku tego wieku przesłedzono poważne implikacje tego faktu. Właśnie wtedy Alfred Wegener, niemiecki meteorolog, zaczął gromadzić i porównywać informacje o florze i faunie różnych kontynentów. Zapoznał się dokładnie z ówczesnym stanem wiedzy na temat ich geologii i paleontologii, czyli z zapisem kopalnym poszczególnych kontynentów. Na podstawie zdobytych informacji Wegener doszedł do nieuniknionego wniosku, że kontynenty, w tym Ameryka Połu-

dniowa i Afryka, były w przeszłości połączone. Odkrył on na przykład, że pewne zjawiska geologiczne, które wydają się kończyć nagle na wybrzeżach Ameryki Południowej, mają swoje odpowiedniki w Afryce. Gdyby dopasować kontynenty, niczym kawałki układanki, obserwuje się ciągłość tych zjawisk. Wegener stwierdził również istnienie geologicznych śladów dawnego zlodowacenia, które zdarzyło się w przybliżeniu w tym samym czasie w Australii, Indiach i Afryce Południowej. Odkrył, że można połączyć kontynenty w taki sposób, aby obszary zlodowaceń do siebie pasowały. W 1915 roku opublikował (w języku niemieckim) książkę zatytułowaną *Powstanie kontynentów i oceanów*, w której przesłedził szczegółowo te świadectwa i sformułował teorię „dryfu kontynentów”. Pomimo ogromnej ilości danych geologicznych, zgromadzonych przez Wegenera, upiększył on wiele ważnych szczegółów i dość selektywnie dobierał dowody przemawiające na rzecz swojej teorii. Częściowo właśnie dlatego jego hipoteza nie została potraktowana poważnie. Co więcej, ówczesni wybitni fizycy oświadczyli, że zewnętrzną część Ziemi jest o wiele za sztywna, aby kontynenty mogły dryfować jak statki na powierzchni morza. W szczególności wskazali oni, że siły, które według Wegenera miały poruszać kontynenty - siły odśrodkowe powstające w

wyniku obrotu Ziemi - są zdecydowanie zbyt słabe, aby tego dokonać. Pomysły Wegenera upadły, ponieważ brakło mechanizmu: oświadczono, że dryf kontynentów jest niemożliwy z powodu braku siły je poruszającej.

Wegener był jednak na właściwym tropie. Choć nie przebiega to dokładnie tak, jak sugerował, dryf kontynentów jest faktem. Afryka i Ameryka Południowa były w przeszłości połączone dokładnie tak, jak to przedstawił Wegener. Co najmniej raz w historii wszystkie dzisiejsze kontynenty połączyły się ze sobą, tworząc superkontynent rozciągający się od bieguna do bieguna. Dryf kontynentów Wegenera omawiany jest dziś w podręcznikach i nauczany w szkole średniej. Stanowi on podstawę naszej wiedzy na temat, jak działa Ziemia. Dziś nazywa się to tektoniką płyt.

## Świadectwa z dna oceanu

Ponowne narodziny idei Wegenera w formie teorii tektoniki płyt nastąpiły przede wszystkim w wyniku prowadzonych w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych badań dna morskiego. W czasie drugiej wojny światowej oraz po niej Marynarka Stanów Zjednoczonych dążyła do zdobycia możliwie największej wiedzy na temat oceanów. Geolodzy i geofizycy pomagali, niektórzy być może z pobudek patriotycznych, lecz wielu uznało to za wspaniałą okazję, aby dowiedzieć się czegoś o dnie morskim. Było to wówczas pogranicze wiedzy właściwie nieznane; nawet znacznie później wielu geologów z dumą podkreślało, że więcej wiemy o powierzchni Księżyca niż o dnie oceanów. Marynarka okazała się hojną i badania oceanograficzne *zataczały coraz szersze kręgi*. Większość z nich nie była utajniona, tak więc kolejne odkrycia wprowadziły nauki o Ziemi na nowy i bardziej ilościowy poziom.

Jednym z najbardziej znaczących wyników intensywnych badań dna morskiego była dokładniejsza wiedza o jego topografii. Część informacji została, oczywiście, zebrana podczas mających długą historię podróży morskich. Najwcześniejsze pomiary wykonywano, spuszczać po prostu ze statku linę sondażową i mierząc jej długość, lecz dane ograniczone były do płytkowodnych regionów przybrzeżnych, po których dużo podróżowano. Echośondy, które pojawiły się na statkach w latach dwudziestych, choć dość proste i niezbyt rozpowszechnione aż do czasów znacznie późniejszych, dostarczyły bogactwa informacji w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych. Instrumenty owe mierzą z dość dużą dokładnością czas, w jakim impuls dźwiękowy przebiega drogę ze statku do dna morskiego i z powrotem. Ponieważ znamy prędkość rozchodzenia się

dźwięku w wodzie morskiej, na tej podstawie można w prosty sposób obliczyć głębokość. Wspaniałość echosondy polega na tym, że może ona pracować dzień i noc, niezależnie od tego, co dzieje się ze statkiem. Ponieważ każda ekspedycja oceanograficzna używała echosondy bez przerwy, zaczęły się wyłaniać szczegóły dna morskiego.

Dziś sporządzanie map dna oceanu jest jeszcze prostsze - dokonują tego satelity krążące na orbicie okołoziemskiej. Satelity mierzą bardzo dokładnie „wysokość” powierzchni morza. Po uwzględnieniu odchylen, spowodowanych prądami i falami, pojawia się godny uwagi obraz. Różnice w poziomie powierzchni morza w poszczególnych miejscach odpowiadają topografii dna morskiego. Spowodowane jest to faktem, że małe odchylenia w sile przyciągania, wynikające z pewnych cech dna morskiego - na przykład dodatkowej masy dużego wulkanu lub przeciwnie, deficytu masy w wypadku głębokiego rowu - w rzeczywistości wpływają na poziom powierzchni morza ponad nimi. Ta stosunkowo nowa technika pomiarowa pozwoliła odsłonić zjawiska, których nigdy nie stwierdzono, przeprowadzając badania ze statków.

Wróćmy jednak do topografii dna morskiego na podstawie informacji zebranych przez stacje oceanograficzne w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych. Szybko stało się dość jasne, że dno oceanu nie jest tak jednostajne, jak sobie wyobrażano. Powszechnie sądzono, że głębokie oceany są niezmiennymi, geologicznie spokojnymi miejscami, gdzie od początku dziejów gromadzą się, warstwa po warstwie, drobny muł i il, zmywane z kontynentów. Niewielu ludzi zastanawiało się nad tym dokładniej, gdyby bowiem tak było naprawdę, to w oceanach musiałaby się znaleźć ogromna ilość osadów. W miarę napływania danych na temat dna oceanu szybko jednak zrozumiano, że nie ma płaskiego, pozbawionego jakichkolwiek cech dna głębokiego morza, pokrytego osadami. Na dnie morskim istnieją ogromne grzbiety, głębokie rowy, wielkie wulkany i długie, strome skąpy. Natychmiast przystąpiono do wyjaśniania, w jaki sposób powstały te struktury.

Wielu ludzi miało okazję oglądać popularne mapy świata, przygotowane przez National Geographic Society, po raz pierwszy pokazujące powierzchnię Ziemi z osuszonymi oceanami. Choć są one nieco uproszczone, to jednak uderza widok rozległych grzbietów czy wyniesień na dnie morskim. Mówi się, że gdyby usunąć oceany, struktury te stałyby się najbardziej typową cechą ziemskiej topografii widoczną z kosmosu. Szcze-

gólnie wyraźny na tych mapach jest grzbiet na dnie Atlantyku, częściowo dlatego, że Ocean Atlantycki umieszczany jest w ich centrum. Grzbiet Śródatlantycki dość dokładnie rozcina ocean na dwie części, dopasowując się do wypukłości i wcięć wybrzeży po obu stronach, a więc również w przybliżeniu dzieli mapę na poł. Przeciętnie wznosi się na 2,5 kilometra ponad otaczające go od

wschodu i zachodu głębsze fragmenty dna morskiego i w większości miejsc przecięty jest w centrum ryfem. Na północnym Atlantyku grzbiet wychodzi na powierzchnię morza - to Islandia.

Ten grzbiet przecinający Atlantyk jest w rzeczywistości częścią mniej lub bardziej ciągłego systemu rozwiniętego we wszystkich oceanach. Otacza on kontynent antarktyczny i dociera dwoma odgałęzieniami do Oceanu Indyjskiego i dalej do Morza Arabskiego. Wędruje zachodnią częścią Pacyfiku i pozornie znika w pobliżu Zatoki Kalifornijskiej w Meksyku, lecz jego mały segment pojawia się ponownie u północno-zachodnich wybrzeży Stanów Zjednoczonych i Kolumbii Brytyjskiej. Jakie jest pochodzenie tego systemu grzbietów, stanowiącego tak charakterystyczną strukturę na Ziemi? Dlaczego nie jest on pogrzebany pod osadami pochodzącymi z kontynentów? I co ma wspólnego z dryfem kontynentów i tektoniką płyt?

Obserwacja, której zwykle przypisuje się zasadnicze znaczenie w wyjaśnieniu genezy systemu grzbietów i która w końcu doprowadziła do powstania teorii tektoniki płyt, pochodziła z dość nieoczekiwanego źródła: były to magnetyczne właściwości dna morskiego. Usiłując dowiedzieć się o nim jak najwięcej, geofizycy mierzyli między innymi lokalne pole magnetyczne dużych pasów dna morskiego. Wiedzano już, że skały zawierające minerały magnetyczne mogą zmienić w niewielkim stopniu lokalne pole magnetyczne Ziemi, i pomiarów namagnesowania używano na kontynentach jako narzędzia poszukiwawczego. Wiele ważnych gospodarczo złóż mineralnych zawiera znaczne ilości minerałów magnetycznych, a ich obecność powoduje charakterystyczne anomalie regionalnego pola magnetycznego. Tak więc kształt zmian pola magnetycznego na kontynentach jest skomplikowany, będąc odbiciem

złożonej budowy geologicznej. Kiedy zaś po raz pierwszy użyto magnetometrów na statkach, odkryto, że kształt stref namagnesowania w skałach dna morskiego jest bardzo regularny. Zaobserwowali to po raz pierwszy naukowcy z Instytutu Oceanograficznego Scrippsa i bardzo ich to zaintrygowało. W latach pięćdziesiątych prowadzili oni badania magnetyzmu u północno-zachodnich wybrzeży Stanów Zjednoczonych i uzyskany obraz był zupełnie odmienny od wszystkiego, cokolwiek stwierdzono na kontynentach. Doszli ostatecznie do wniosku, że regularny wzór zmienności lokalnego pola magnetycznego był najprawdopodobniej w jakiś sposób związany z dość regularną topografią dna morskiego w tym obszarze, w postaci niskich *wzgórz i dolin*. Lecz hipoteza ta żyła bardzo krótko. W latach sześćdziesiątych lotnicze badania magnetyzmu prowadzone na północnym Atlantyku, tuż na południe od Islandii, dostarczyły zaskakujących, a dziś już klasycznych rezultatów. Przeprowadziwszy serię trawersów w poprzek osi Grzbietu Śród atlantyckiego, naukowcy z Obserwatorium Geo-

logicznego Lamonta z Uniwersytetu Columbia stwierdzili, że pole magnetyczne dna morskiego zmienia się w sposób symetryczny, dokładnie wokół centrum grzbietu. Co więcej, obserwowali oni również, że obraz zmienności pola magnetycznego był zasadniczo identyczny w każdym trawersie przeprowadzonym w poprzek grzbietu, niezależnie od jego położenia. Kiedy dane te naniesiono na mapę badanego obszaru, ułożyły się one w obraz przypominający paski zebry, odpowiadające zmieniającej się wartości namagnesowania, podobny do uzyskanego przez naukowców z Instytutu Oceanograficznego Scrippsa na północnym Pacyfiku, lecz różniący się w sposób zasadniczy z powodu wyraźnej symetrii (ryc. 5.1). I znowu wzór ten był uderzająco inny niż typowy kontynentalny zapis magnetyczny. W miarę jak gromadziło się więcej danych, stało się jasne, że ten sam symetryczny kształt pojawia się wszędzie wzdłuż systemu grzbietów oceanicznych.

Kiedy roztopiona magma stygnie, tworząc skały magmowe, część powstających w nich minerałów zawierających żelazo zostaje namagnesowana przez ziemskie pole magnetyczne.

Odbywa się to tak, jak gdyby owe minerały zawierały drobne pałeczki magnetyczne czy igły kompasu, wszystkie bowiem układają się zgodnie z otaczającym je polem. Magnetyzacja jest stała i dzięki temu stanowi zapis kopalny, charakteryzujący ziemskie pole magnetyczne w czasie tworzenia się skały. Jest ona dość stabilna i zachowuje się przez długi czas. Jak można było oczekiwać, badania wykazały, że skały na szczycie Grzbietu Śród atlantyckiego są dość silnie namagnesowane, zgodnie z dzisiejszym polem magnetycznym. Lecz symetryczny, przypominający paski zebry wzór wydawał się wskazywać, że dno morskie jest namagnesowane pasmowo. Niektóre z owych pasm, podobnie jak skały na szczycie grzbietu, wykazują namagnesowanie normalne - ich charakterystyka odpowiada skałom zastygającym w dzisiejszym polu magnetycznym. Występują one jednak na przemian z pasmami o przeciwnym namagnesowaniu, tak jak gdyby bieguny magnetyczne Ziemi - północny i południowy - ulegały zamianie w czasie tworzenia się owych segmentów dna morskiego.

Ziemskie pole magnetyczne ma charakter dipolowy, co oznacza, że jest ono podobne do pola mogącego powstać, gdybyśmy we wnętrzu umieścili gigantyczny magnes sztabkowy. Kiedy prowadzono pierwsze badania namagnesowania dna morskiego, większość naukowców nie miała żadnego powodu, aby sądzić, że w przeszłości geologicznej pole magnetyczne różniło się znacznie od dzisiejszego. Jednocześnie badania namagnesowania skał na kontynentach ujawniły intrygujące zjawie-

sko. Odkryto, że w pewnych regionach, gdzie nagromadziły się potoki lawy dużej grubości, większość z nich była namagnesowana zgodnie z dzisiejszym ziemskim polem magnetycznym,

lecz niektóre miały przeciwne namagnesowanie. Początkowo sądzono, że przyczyną był jakiś proces wtórny, lecz kiedy stwierdzono bardzo podobne sekwencje normalnie i przeciwnie namagnesowanych potoków lawy w kilku różnych miejscach, zdano sobie sprawę, że ziemskie pole magnetyczne musiało w skali czasu geologicznego wielokrotnie zmieniać swoją kierunkowość! Było to zaskakujące. W świetle tego odkrycia regularne pasma namagnesowania na dnie morskim nabrały ogromnego znaczenia. Choć badacze nie zakrzyknęli „eureka!”, kilku z nich - Lawrence Morley w Kanadzie i Fred Vine oraz Drummond Matthews w Wielkiej Brytanii - prawie jednocześnie zdało sobie sprawę z tego, że pasma namagnesowania na dnie morskim, zmiana biegunowości pola i dryf kontynentów są powiązane. Nagle zrozumieli, że pasmowy wzór namagnesowania dna morskiego jest zapisem dokładnie takiej samej sekwencji zmian biegunowości jak w wypadku bazaltów kontynentalnych.

Owe obserwacje przekonały większość geologów, że *rozszerzanie* się (spreading) dna morskiego rzeczywiście zachodzi. Nowa skorupa oceaniczna jest wytwarzana w sposób ciągły przez lawę wylewającą się w centrum grzbietu. Wzór namagnesowania układa się symetrycznie, ponieważ lawa ulega namagnesowaniu w miarę jak stygnie, stając się twardą skałą, i rozchodzi się równomiernie na boki. Dno morskie działa jak rodzaj gigantycznego magnetofonu, wiernie zapisując zmiany (rewersje) kierunku ziemskiego pola magnetycznego (ryc. 5.1). Ponieważ z analiz skał na lądzie znane są datowania różnych zmian kierunku, można więc użyć magnetycznych pasm na dnie oceanów jako markerów czasowych. Tempo tworzenia się nowego dna morskiego wylicza się w dość prosty sposób - przez pomiar odległości od centrum grzbietu, gdzie wiek dna morskiego jest praktycznie równy zeru, do różnych datowanych zmian kierunku. Geolodzy nazywają pasma magnetyczne anomaliami i ponumerowali je, aby było je łatwo zidentyfikować. Ci, którzy

z nimi pracują, oswoili się z tym: „Aha, to wygląda jak anomalia 29R!” (R oznacza odwrócony, a N normalny kierunek dzisiejszego pola magnetycznego). Choć w różnych miejscach ma ono różną wartość, to tempo tworzenia się dna morskiego wyliczone na podstawie anomalii magnetycznych wynosi zwykle kilka centymetrów na rok. Mniej więcej w tym tempie rosną paznokcie - niezbyt szybko, lecz w sposób wyraźnie zauważalny, jeśli zapomnimy przez jakiś czas o ich przycinaniu. Kontynenty po obu stronach Atlantyku oddalają się od siebie również w tym tempie, co wyjaśnia, dlaczego oceany nie są wypełnione osadami. Oceany są geologicznie młode. Choć kilka centymetrów na rok to rzeczywiście powoli, jednak w takim tempie Ocean Atlantycki mógł powstać w czasie krótszym niż dwieście milionów lat, co nie jest okresem bardzo długim w skali czasu geologicznego. I rzeczywiście, żaden fragment dna morskiego w ziemskich oceanach nie jest wiele starszy. W porównaniu z kontynentami, skały dna oceanicznego są

zwyčajnymi młodzieniaszkami.

Po obu stronach Atlantyku kontynenty są mocno spojone ze skałami dna morskiego. Odsuwają się od siebie z prędkością, która *zależy* od tempa tworzenia się nowego dna morskiego na Grzbiecie Śród atlantyckim. W ten sposób wątpliwości fizyków dotyczące wegenerowskiej wersji dryfu kontynentów przestają być zasadne, ponieważ kontynenty nie muszą „przeorac” sztywnych skał dna oceanicznego. Skorupą kontynentalną i oceaniczną poruszają się razem, tworząc część jednej płyty litosfery (ryc. 1.215.2).

## Tektonika płyt

Istnienie wzoru namagnesowania dna morskiego i zrozumienie jego pochodzenia, tak jak to opisano wyżej, przesądziło sprawę na rzecz dryfu kontynentów, choć termin ten został szybko zastąpiony przez równie opisowe, lecz precyzyjniejsze „rozszerzanie się” (spreading) dna morskiego. Lata sześćdziesiąte to okres gwałtownych przemian w geologii; rozwój idei spreadingu dna

morskiego i jego konsekwencje zostały nazwane przez niektórych rewolucją i przyrównywano je do wstrząsu w fizyce, wywołanego teorią względności i mechaniką kwantową. Implikacje spreadingu zostały bardzo szybko prześledzone zarówno przez teoretyków, usiłujących opisać proces w sposób matematyczny, jak i przez eksperymentatorów, którzy za pomocą coraz bardziej wymyślnych instrumentów dokonywali pomiarów, testując teorie matematyczne. Teoria spreadingu dna morskiego wyjaśniła nagle wiele poprzednio słabo rozumianych zjawisk. Wkrótce rozszerzanie się dna morskiego i dryf kontynentów włączono do znacznie szerszej i mającej daleko idące konsekwencje teorii, zwanej tektoniką płyt.

Czym dokładnie jest teoria tektoniki płyt i dlaczego poświęca się jej tak wiele uwagi w naukach o Ziemi? Najprościej mówiąc, są to ogólne założenia, które pozwalają zrozumieć większość procesów geologicznych zachodzących dzisiaj i przez znaczną część ziemskiej historii. To prawda, wielu szczegółów nie sposób natychmiast wytłumaczyć w terminach tektoniki płyt, lecz czy jest to słaba strona teorii, czy po prostu niedostatek wiedzy, pozostaje ciągle niejasne. W ogólnych zarysach jednak koncepcja tektoniki płyt jest bardzo potężnym narzędziem do zrozumienia, jak funkcjonuje Ziemia.

Słowo tektonika pochodzi od greckiego *tekton*, oznaczającego budowniczego lub stolarza. Płyty są kawałkami litosfery, tj. stosunkowo sztywnej zewnętrznej części Ziemi, która rozciąga się przeciętnie do głębokości około 100 km (ryc. 1.2), choć miejscami bywa cieńsza lub grubsza. Znamy dzisiaj około 10 płyt, od średnich do dużych rozmiarów, i o wiele więcej „mikro-płyt” (ryc. 5.2). Jak wyjaśniono wcześniej, to płyty litosfery, a nie kontynenty, poruszają się po powierzchni Ziemi;

kontynenty i oceany są jedynie współpasażerami tej wędrówki. Płyty mogą się poruszać, ponieważ wewnątrz Ziemi jest gorąco i dość łatwo ulega deformacjom, a nawet płynię. Trudno wyobrazić sobie zwykłe skały zachowujące się tak plastycznie, lecz warto pamiętać, że również inne ciała, zwykle uważane za kruche, także powoli płyną, jeśli zostaną poddane umiarkowanym naciskom w ciągu długich okresów. Przykładem jest lód w lodow-

cach. Podstawa płyty znajduje się na głębokości, na której temperatura skał wewnątrz jest bliska punktowi topnienia, a tarcie pomiędzy względnie sztywną litosferą i niżej leżącym płaszczem spada do minimum.

Mechanizm, wprawiający płyty w ruch, ciągle nie jest dokładnie znany. Nie stanowi to już jednak powodu do drwin, jak w czasach Wegenera. Wiemy, że płyty się poruszają; dzięki satelitom można dzisiaj zmierzyć zmiany odległości między dwoma punktami na różnych płytach wystarczająco dokładnie, aby tego dowieść, a nawet zmierzyć prędkość ruchu płyty. Wiemy również, że energia konieczna do ruchu płyt pochodzi z wnętrza Ziemi, zarówno z nieustannego procesu ochładzania od początkowo gorącego stanu, jak i z ciepła wytwarzanego w procesie rozpadu promieniotwórczego pierwiastków we wnętrzu, takich jak uran i tor. To ciepło przenoszone jest w kierunku powierzchni w wyniku powolnej konwekcji, zachodzącej w ciałach stałych, i w końcu zostaje wypromieniowane w przestrzeń. Połączenie gorącego płaszczka, w którym zachodzi konwekcja, z chłodniejszą i bardziej sztywną litosferą może być jedną z przyczyn ruchu płyt.

Większość procesów geologicznych zachodzi na granicach płyt. Dotyczy to wulkanizmu, trzęsień ziemi, powstawania gór, metamorfizmu, a nawet tworzenia się wielu rodzajów gospodarczo ważnych złóż mineralnych. Lecz nie wszystkie krawędzie płyt są takie same. Na rycinie 5.2 widać, że w niektórych miejscach płyty oddalają się od siebie, w innych się zderzają, a gdzieś po prostu ślizgają się wzdłuż siebie. Ponieważ nie ma żadnego stałego punktu odniesienia, kierunki ich ruchu podaje się tylko w terminach względnych. Można stanąć na krawędzi i określić, czy przyległa płyta przybliżyła się, czy oddala, lecz nie można wyznaczyć absolutnego kierunku jej ruchu.

Granice płyt podzielono na kategorie na podstawie typu względnego ruchu, następującego wzdłuż nich. Każda granica ma własną charakterystykę i na przykład przy różnych granicach powstają odmienne typy skał. Stwierdzenie tego faktu stało się szczególnie ważne dla naukowców starających się odtworzyć przeszłość Ziemi, ponieważ przebieg dawniej zachodzących zja-

wisk może zostać odtworzony na podstawie zachowanych skał. Ponownie użyteczna staje się tutaj zasada uniformitaryzmu.



## Rozbiegające się płyty

W miejscach, gdzie płyty oddalają się od siebie, w skorupie ziemskiej istnieją ryfty. W tych miejscach wylewają się, wypełniając je, bazalty - najpospolitszy produkt przetapiania wnętrza Ziemi; jak już zaobserwowaliśmy, w ten właśnie sposób powstaje nowe dno morskie. Większość granic rozbiegających się płyt występuje w oceanach. Na pierwszy rzut oka może się wydać paradoksalne, że ryfty, będące dolinami albo zagłębieniami, znajdują się często w centrum grzbietów, które są rozległymi wyniesieniami topograficznymi, jak to pokazano na rycinie 5.3. Grzbiety powstały wskutek wynoszenia materiału płaszcza i ciepła, które temu towarzyszy; ponieważ nowo powstała skorupa stygnie, kurczy się i staje się gęstsza w miarę odsuwania się od grzbietu, równocześnie się obniża. Głębokość oceanu wzrasta dwukrotnie z około 2,5 do 5 kilometrów, począwszy od grani do starszych części dna morskiego, oddalonych od centrum spredingu.

Ryc. 5.3. Schematyczny przekrój przez grzbiet śródoceaniczny przedstawia dolinę ryftową w jego centrum. Pionowe, czarne linie są kanałami, przez które magma wypływa z płaszcza na dno morza.

Większość dzisiejszych grzbietów oceanicznych zaczynała jako ryfty wewnątrz kontynentu. Początek procesu to utworzenie się głębokiej doliny ze stromymi ścianami, zwykle charakteryzującej się silnym wulkanizmem. Taka była geneza śród-kontynentalnego ryftu, który prawie rozdarł Amerykę Północ-

na w proterozoiku; współczesnym przykładem jest Wschodnio-afrykańska Dolina Ryftowa. W końcu, na skutek spredingu, skorupa kontynentalna - która pływa po powierzchni, ponieważ zbudowana jest ze skał o mniejszym ciężarze właściwym niż bazalty wypełniające ryft - zostaje rozerwana. Do środka wlewa się morze i powstaje zaczątkowy basen oceaniczny. Takie procesy musiały zachodzić w momencie otwierania się około 180 milionów lat temu Atlantyku, oddzielającego Europę i Afrykę od obu Ameryk. Dziś wczesne stadia pękania kontynentów obserwuje się w Morzu Czerwonym - Afryka zaczyna się oddzielać od Półwyspu Arabskiego wzdłuż odnogi systemu grzbietów z Oceanu Indyjskiego. Wszystkie baseny oceaniczne na świecie powstały w wyniku tworzenia się ryftu i wszystkie są podścielone gęstymi bazaltami. Kontrast pomiędzy skorupą oceaniczną o dużej gęstości a lżejszą, łatwiej utrzymującą się na powierzchni skorupą kontynentów jest przyczyną różnic w ich stopniu wyniesienia.

Nowe dno morskie powstaje w sposób ciągły wzdłuż grzbietów oceanicznych i rozplywa się symetrycznie na obie strony.

Podczas gdy zarys kontynentów pozostaje dość niezmienny w ciągu długich okresów czasu geologicznego, geografia basenów oceanicznych zmienia się znacznie szybciej. Tempo spreduingu mierzone wzdłuż dzisiejszych grzbietów oceanicznych waha się od 1-2 centymetrów aż po 20 centymetrów rocznie. Nawet gdy przyjmiemy dolne wartości, basen oceaniczny tysiąckilometrowej szerokości może powstać w ciągu 100 milionów lat.

## Zderzenia płyt i strefy subdukcji

Jeśli powstaje tak wiele nowego dna morskiego, a jednak Ziemia nie rozszerza się (istnieją na to wystarczające dowody), to gdzieś na kuli ziemskiej skorupa musi ulegać zniszczeniu. I tak się właśnie dzieje wokół większej części obrzeża Pacyfiku. Płyty litosfery zbiegają się tam i na ich granicach jedną ze zderzających się płyt zanurza się pod drugą, pograżając się głąbo-

ko we wnętrzu Ziemi. Takie kolizyjne granice są zwane strefami subdukcji i zaznaczają się na powierzchni jako głębokie rowy oceaniczne z aktywnymi wulkanami (ryc. 5.4). Spektakularny łańcuch wulkanów, tworzących słynny pierścień ognia wokół obrzeży Pacyfiku - Andy, Aleuty, wulkany Kamczatki, Japonia i Mariany - zawdzięcza swoje istnienie zjawisku subdukcji.

Nikt nie jest pewien, w jaki sposób rozpoczyna się subdukcja, kiedy dwie płyty zaczynają się zbliżać. Kluczem do tego zjawiska wydaje się gęstość skał. Skorupa oceaniczna o dużej gęstości może ulegać subdukcji, znikając w ziemskim wnętrzu i nie pozostawiając śladów, podczas gdy stosunkowo lekkie kontynenty pozostają na zawsze na powierzchni. Z tego właśnie powodu dno oceanu jest młode, podczas gdy kontynenty stare: dno morza nie tylko tworzy się nieustannie na grzbietach, lecz jest również ciągle niszczone w strefach subdukcji. Jak stwierdziliśmy, niektóre fragmenty kontynentów liczą sobie prawie 4 miliardy lat, podczas gdy najstarsze dno morskie ma zaledwie 200 milionów lat. Jeden z pierwszych badaczy dryfu kontynentalnego porównał nawet kontynenty do piany gromadzącej się w garnku podczas gotowania zupy, co jest bardzo żywą, lecz mało precyzyjną analogią.

Zjawisko subdukcji potwierdzają trzęsienia ziemi, które jej towarzyszą. Chociaż aktywność sejsmiczną występuje na granicach wszystkich typów płyt, jedynie strefy subdukcji charakteryzują się głębokimi trzęsieniami ziemi; niektóre występują na głębokości 600 lub więcej kilometrów. Głębokie trzęsienia ziemi znane były dużo wcześniej, zanim tektonika płyt stała się modną. W 1928 roku japoński sejsmolog K. Wadati doniósł o trzęsieniu ziemi na głębokości kilkuset kilometrów pod Japonią. Około dwudziestu lat później inny geofizyk, Hugo Benioff, wykazał, że również w innych częściach świata istnieją „wielkie uskoki”, charakteryzujące się częstymi trzęsieniami ziemi i zanurzające się

w dół do płaszcza z rowów oceanicznych. Stwierdził je zarówno wzdłuż zachodnich wybrzeży Ameryki Południowej, jak i na południowo-zachodnim Pacyfiku w Rowie Tonga. Obszary te były więc już rozpoznane jako strefy sub-

dukcyj; dopiero później zdano sobie sprawę, że te wielkie strefy aktywności sejsmicznej dokładnie odpowiadają miejscom zanurzania się płyt w głąb płaszcza (ryc. 5.4). Do trzęsień ziemi dochodzi, ponieważ zanurzające się płyty oceaniczne są chłod-

niejsze od otaczającego je plastycznego płaszcza i - gdy schodzą do gorącego wnętrza - nawet na dużych głębokościach pozostają dostatecznie kruche, aby ulegać pęknięciom. Niektóre z najgłębszych trzęsień ziemi mogą się zdarzać dlatego, że minerały w zanurzającej się płycie stają się niestabilne pod wpływem olbrzymich ciśnień i rozpadają się gwałtownie, tworząc minerały o większej gęstości, czemu towarzyszy nagła zmiana ich objętości.

W przeciwieństwie do stosunkowo spokojnych erupcji bazaltów w oceanicznych centrach spredingu, wulkanizm występujący wzdłuż stref subdukcji ma często gwałtowny charakter. Choć te wybuchy tworzą szczególnie piękne wulkany, takie jak Fudzi w Japonii, są jednak powodem wielu nieszczęść. Najbardziej znane katastrofy to pogrzebanie Pompei przez gorący popiół wulkaniczny z Wezuwiusza, ogromne ofiary w wyniku erupcji Krakatau w Indonezji w 1883 roku oraz niedawne wielkie zniszczenia dokonane przez erupcję Pinatubo na Filipinach w 1991 roku. Dlaczego w strefach subdukcji występuje wulkanizm? Napomykałismy już o tym w rozdziale 2. Płyty oceaniczne zawierają wodę. Woda występuje w grubych pokładach osadów, które gromadzą się na dnie oceanów, w miarę jak przesuwa się ono od miejsca swego powstania na grzbiecie w kierunku stref subdukcji. Poza tym w czasie tej długiej podróży niektóre z minerałów skorupy bazaltowej reagują z wodą morską, tworząc nowe minerały zawierające wodę. Choć część osadów zostaje jakby zdrapana i nasunięta na ląd podczas kolizji płyt, reszta transportowana jest na znaczne głębokości do płaszcza. W miarę jak owe osady zagłębiają się wzdłuż strefy subdukcji, większość wody, nie związanej w porach pomiędzy ziarnami, zostaje wycisnięta w wyniku wzrostu ciśnienia i wędruje z powrotem na powierzchnię. Część jednak pozostaje, podobnie jak woda, która jest trwale związana w minerałach skorupy. W końcu jednak temperatura i ciśnienie usuwają i tę resztę, która przesącza się do płaszcza ponad płytę ulegającą subdukcji. To właśnie ten proces jest odpowiedzialny za wulkanizm. Na głębokościach, na których usuwana jest woda, otaczający płaszcz jest już dość gorący i woda morska obniża

temperaturę topienia wystarczająco, by proces ten mógł się rozpocząć. Zasada ta jest znana mieszkańcom północnych krajów, gdzie zimą posypuje się ulice solą, aby obniżyć temperaturę topnienia lodu.

We wszystkich ziemskich strefach subdukcji aktywny wulkanizm występuje niezmiennie na tej samej głębokości, około 150 kilometrów ponad zanurzającą się płytą. W przybliżeniu jest to głębokość, na której ulegają rozkładowi minerały zawierające wodę; uwalniając ją, inicjują topienie. Charakterystycznym typem skały w takich miejscach jest andezyt, nazwany tak, jak się można domyślać, ponieważ pospolicie występuje w Andach. Eksperymenty laboratoryjne wykazują, że andezyt jest dokładnie taką skałą, jakiej można by oczekiwać w wyniku topienia się płaszcza w obecności wody pochodzącej z płyty ulegającej subdukcji. Woda jest również przyczyną gwałtownego przebiegu wulkanizmu w strefach subdukcji. W miarę jak magma *zbliża* się do powierzchni, rozpuszczona w niej woda i inne lotne składniki, reagując na niższe ciśnienie, powiększają swoją objętość raptownie i w sposób wybuchowy.

Wiele największych trzęsień ziemi na świecie zdarza się wzdłuż stref subdukcji. Trudno się temu dziwić: *zderzają* się tam dwa gigantyczne fragmenty ziemskiej powierzchni, każdy grubości około 100 kilometrów, i jedna płyta wsuwa się pod drugą. Niestety, niektóre obszary w pobliżu stref subdukcji są gęsto zaludnione. Możemy przewidzieć ze stuprocentową pewnością, że silne, niszczące trzęsienia ziemi będą w takich regionach występować dalej. Jest to jednak małą pociechą wobec takich tragicznych wydarzeń, jak trzęsienie ziemi, które nastąpiło w 1995 roku w Kobe w Japonii.

Ziemia jednakże jest planetą dynamiczną i nawet strefy subdukcji nie są wieczne, przynajmniej w geologicznej skali czasu. W końcu przestają one działać, a gdzie indziej powstają nowe. Jakiego rodzaju zdarzenia mogą doprowadzić do zatrzymania procesu subdukcji? Najczęściej jest to zderzenie dwóch kontynentów po tym, gdy skorupa oceaniczna pomiędzy nimi została całkowicie wchłonięta przez subdukcję. Pamiętajmy, że płyty niosą zarówno skorupę kontynentalną, jak i oceaniczną.

Podczas gdy samej płycie może być obojętna natura jej pasażerów, nie jest to obojętne strefie subdukcji; nie może ona po prostu „przełknąć” skorupy kontynentalnej o niskiej gęstości. Kiedy więc w końcu w wyniku subdukcji zamyka się basen oceaniczny, dwa fragmenty skorupy kontynentalnej *zderzają* się i ulegają połączeniu, a subdukcja zostaje zatrzymana. Uproszczony szkic tego procesu pokazano na rycinie 5.5. Nie jest to takie zupełnie proste, jak może wynikać z naszego opisu; zwykle zderzenie pomiędzy kontynentami związane jest z silnym wulkanizmem, metamorfizmem, tworzeniem się gór i trwa bardzo długo.

Przykładem tego procesu z nieodległej przeszłości jest kolizja między Indiami i Azją, która stworzyła Himalaje, opisana bar-

dziej szczegółowo w *rozdziale 11*. Niegdyś w pobliżu miejsca, gdzie obecnie wznoszą się Himalaje, istniała strefa subdukcji zagłębiająca się ku północy pod Azję i rozległy ocean pomiędzy Azją a kontynentem indyjskim daleko na południu. Skały Himalajów i Wyżyny Tybetańskiej świadczą, że sytuacja taka trwała bardzo długo i że wiele bardzo małych fragmentów skorupy transportowanych przez płytę oceaniczną przybyło do strefy subdukcji i zostało dolepione do południowej krawędzi Azji. Lecz stopniowo dno oceanu było pochłaniane przez strefę subdukcji, pociągając kontynent indyjski ku północy. Mniej więcej 50-60 milionów lat temu róg tego kontynentu dotarł do strefy subdukcji i zaczął zderzać się z Azją. Siła zderzenia spowodowała, że północna część kontynentu indyjskiego wślizgnęła się pod południową Azję, tworząc skorupę kontynentalną prawie dwa razy grubszą niż gdziekolwiek indziej na świecie. Osady występujące przed kolizyjnymi krawędziami dwóch kontynentów, wyspy wulkaniczne, które istniały wzdłuż nich, i skały kontynentu wzięły udział w gigantycznej katastrofie, zostały sfaldowane, pocięte uskokami i zmetamorfizowane. Rezultatem jest najwyższy łańcuch górski i najwyższej położona wyżyna na Ziemi.

Rozległy region górski Himalajów jest ciągle uważany za granicę płyt, ponieważ pomiędzy Azją i Indiami ciągle zachodzą ruchy względne. Jest on stale wynoszony i występują tam częste trzęsienia ziemi. W rzeczywistości trzęsienia ziemi uwalniające naprężenia w skorupie występują dziś nawet daleko od strefy kolizji, szczególnie w Chinach, ponieważ części Azji zostały ściśnięte i skrecone w kierunku wschodnim w wyniku zderzenia się dwóch płyt. W końcu jednak, kiedy względne przemieszczenia pomiędzy dwoma, dawniej oddzielnymi, kontynentami ustaną, Himalaje będą uważane za nieaktywną spinę we wnętrzu kontynentu. Lecz kiedy się to stanie, jakieś inne miejsce będzie musiało przejąć tę rolę, aby pomieścić nowe dno morskie, tworzące się wzdłuż grzbietu leżącego daleko na południu (ryc. 5.2). Najnowsze badania dna morskiego w pobliżu Sri Lanki sugerują, że nowa strefa subdukcji może się właśnie tworzyć na południe od tej wyspy, co rozwiązywałoby geometryczną układankę.

Wydaje się, że kolizje dwóch kontynentów, takie jak ta, która stworzyła Himalaje, występowały regularnie w historii geologicznej Ziemi. Choć stworzone przez nie wysokie góry od dawna nie istnieją, zdarzenia takie można stwierdzić w starszych skałach na podstawie tego, że produkują one zwykle długie pasma silnie zmetamorfizowanych skał, w przybliżeniu tego samego wieku. Dobrym tego przykładem jest prowincja Grenville we wschodniej Ameryce Północnej (ryc. 4.3), która

bez wątpienia przypominała niegdyś obecne Himalaje.

## Uskok San Andreas

Podobnie jak Himalaje i grzbiety śródoceaniczne, uskok San Andreas w Kalifornii stanowi granicę płyt. Los Angeles i San Diego, po jego zachodniej stronie znajdują się na płycie pacyficznej i poruszają się w tym samym kierunku co Hawaje, podczas gdy Berkeley, po wschodniej stronie uskoku, wędruje wraz z Nowym Jorkiem i Miami, na płycie północnoamerykańskiej (ryc. 5.6). Granice płyt, będące uskokami, takimi jak San Andreas, zostały nazwane uskokami przekształcającymi. Występują one głównie w oceanach, łącząc segmenty rozszerzającego się grzbietu. To z ich powodu krawędzie płyt są tak pzszarpane. Wzdłuż tych uskoków nie zachodzi konwergencja lub dywergencja, lecz płyty przesuwają się po prostu wzdłuż siebie. Jeśli ktoś chciałby wymyślić tektonikę płyt, rozbijając zewnętrzną otoczkę globu na kawałki, które na pewnych granicach podlegają subdukcji, a na innych odnawianiu, musiałby stwierdzić, że zjawiska przypominające uskoki przekształcające są geometryczną koniecznością.

Najsławniejszy lub, jeśli kto woli, najbardziej niesławny uskok przekształcający to uskok San Andreas w Kalifornii. On również łączy segmenty oceanicznego systemu grzbietów, lecz inaczej niż większość uskoków przekształcających, przecina bowiem część kontynentu. Ewolucja uskoku San Andreas jest dość zaskakująca (ryc. 5.6). Około 50-60 milionów lat temu wzdłuż całego zachodniego wybrzeża Ameryki Północnej rozcią-

gała się strefa subdukcji. Na zachód od wybrzeża istniał grzbiet oceaniczny, gdzie powstawało nowe dno Pacyfiku. Płyta północnoamerykańska przesuwała się jednak na zachód szybciej niż tworzyło się dno morskie i w końcu kontynent po prostu nasunął się na grzbiet. Po raz pierwszy zdarzyło się to około 30 milionów lat temu i powtarzało etapami, w miarę jak pochłaniana była mała płyta istniejąca między grzbietem a strefą subdukcji. Niektóre drobne jej fragmenty występują u wybrzeży Meksyku na południu i u wybrzeży stanów Oregon, Waszyngton i Kolumbii Brytyjskiej na północy. Kiedy płyta ta zniknęła, powstały nowe granice, aby przystosować sytuację do globalnego oddziaływania płyt. Odpowiedzią litosfery było pęknięcie przy krawędzi kontynentu. Mały fragment Ameryki Północnej został przyczępiony do płyty pacyficznej i narodził się uskok San Andreas.

Na mapach świata, pokazujących płyty tektoniczne tak jak rycina 5.2, uskoki przekształcające pojawiają się jako wyraźne cienkie linie. W rzeczywistości są to bardzo złożone granice, szczególnie kiedy występują w skorupie kontynentalnej. Choć istnieje jeden duży uskok na mapach geologicznych, oznaczony jako San Andreas, w rzeczywistości wąska granica, gdy ogląda go się z powietrza, tak naprawdę płyty ślizgają się wzdłuż siebie na znacznym obszarze Kalifornii, charakteryzu-

jącym się licznymi uskokami i deformacjami. Wiele z nich jest mniej lub bardziej równoległa do uskoku San Andreas, a większość dobrze znanej aktywności sejsmicznej w Kalifornii występuje wzdłuż owych mniej znanych uskoków.

Podsumowując, płyty tworzące na powierzchni Ziemi układankę mają krawędzie, będące grzbieciami, wzdłuż których następuje spreding, strefami subdukcji-kolizji lub uskokami przekształcającymi. To właśnie te regiony na Ziemi charakteryzują się najsilniejszym wulkanizmem, trzęsieniami ziemi i metamorfizmem. System grzbieciami oceanicznych obejmujący cały glob, najwyższe góry na Ziemi oraz jej najpiękniejsze i najgroźniejsze wulkany - wszystko to występuje na granicach płyt.

### **Pióropusze gorąca w płaszczu**

Na podstawie tego, co dotąd powiedziano, ktoś mógłby sobie wyobrazić, że wewnątrz płyt nic się nie dzieje pod względem geologicznym. W większości wypadków jest to prawda, istnieją jednak wyjątki. Rzut oka na mapę, na przykład Pacyfiku, dowodzi, że wewnątrz płyty pacyficznej, z dala od jej granic, istnieje wiele wysp. Wszystkie są wulkanami. Wiele z nich nie wykazuje już aktywności, a niektóre są całkowicie zarośnięte przez korale, lecz wszystkie powstały w wyniku wulkanizmu dna morskiego.

W jaki sposób aktywność wulkaniczna może występować tak daleko od granicy płyty? Hawaje dostarczają tutaj bardzo pouczającej odpowiedzi. Podobnie jak wiele innych grup wysp na oceanach, tworzą one łańcuch. Istotnie, gdyby dodać jeszcze wulkany podmorskie, jest to bardzo długi i imponujący łańcuch rozciągający się od Hawajów aż do Rowu Aleuckiego (ryc. 5.7). W latach czterdziestych ubiegłego wieku amerykański geolog James Doolittle zaobserwował, że różne wyspy hawajskie przeszły podobną ewolucję geologiczną, lecz są one coraz silniej zerodowane, a więc przypuszczalnie starsze, w kierunku zachodnim. Następnie, w 1963 roku, u zarania rozwoju tektoniki płyt, kanadyjski geofizyk Tuzo Wilson zdał sobie sprawę, że różnice w stopniu erozji tych wysp mogły wynikać z różnego czasu ich powstawania na powierzchni płyty poruszającej się ponad stałymi ośrodkami wulkanicznymi w głębi Ziemi. Wilson przypuszczał, że długi łańcuch wulkanów rozciągający się

na północny zachód od Hawajów jest po prostu odbiciem na powierzchni zjawiska od dawna istniejącego, głęboko zakorzonego w płaszczu.

Choć pomysł ten nie od razu został zaakceptowany, stanowi dziś centralną część teorii tektoniki płyt. Hipotezę tę potwierdzają datowania law w łańcuchu Hawajów i innych wysp, pokazujące, że ich wiek wzrasta w miarę oddalania się od dziś aktywnych wulkanów, tak jak sugerował to Dały (ryc. 5.7). Uważa się, że większość wulkanów występujących we wnętrzu płyt jest wynikiem pióropuszy płaszcz - stałych źródeł materiału wulkanicznego, które unoszą się ku górze z głębi płaszczu. Miejsca, takie jak wyspa Hawaii, będące ich dzisiejszym śladem na powierzchni, określa się jako plamy gorąca. Większość dużych, aktywnych wulkanów, położonych wewnątrz płyt, związana jest z łańcuchem śladów plam gorąca, to jest

coraz starszych, wygaśniętych wulkanów, które znaczą drogę powierzchni płyty ponad głęboko usadowionym pióropuszem ciepła. Pióropusze powstają na dużych głębokościach, być może nawet na głębokości odpowiadającej granicy między jądrem i płaszczem, i wiele z nich jest aktywnych przez bardzo długi czas. Najstarsze wulkany w hawajskim łańcuchu śladów plam gorąca liczą około 80 milionów lat. Tahiti i Wyspa Wielkanocna na Pacyfiku, Reunion i Mauritius na Oceanie Indyjskim oraz większość dużych wysp na wszystkich oceanach zawdzięczają istnienie pióropuszom w płaszczu.

## **Jak długo działa tektonika płyt?**

Poza tym, że wiele z nich to wspaniałe miejsca wypoczynku, wulkaniczne wyspy oceaniczne i pozostawione przez nie ślady plam gorąca są szczególnie przydatne geologom, ponieważ rejestrują poprzednie położenia płyty ponad stałym źródłem. Pozwalają więc na odtworzenie przebiegu procesu spreduingu dna morskiego i rekonstrukcję geografii kontynentów oraz basenów oceanicznych w przeszłości. Ponieważ płyty są sztywne, położenie płyty pacyficznej 50 milionów lat temu może być wyznaczone przez takie jej przesunięcie, że wulkan w śladzie plam gorąca, liczący 50 milionów lat, znajdzie się w położeniu wyspy Hawaii.

Ponieważ jednak baseny oceaniczne są w rzeczywistości zjawiskami efemerycznymi w geologicznej skali czasu, rekonstruowanie ziemskiej geografii na podstawie śladów plam gorąca jest możliwe tylko w wypadku ostatnich 5% czasu geologicznego. Ten sam problem dotyczy odtworzenia historii spreduingu dna morskiego za pomocą schematu rewersji magnetycznych. W jaki sposób możemy więc uzyskać informacje o działaniu tektoniki płyt w okresach wcześniejszych? Dla okresu sprzed około 200 milionów lat, bo taki jest wiek najstarszego dna morskiego, jedyne dostępne wskazówki pochodzą z kontynentu i są one znacznie trudniejsze do znalezienia i odczytania. Właściwości magnetyczne skał kontynentalnych, na przykład,



mogą posłużyć do uzyskania informacji o ich położeniu w sto-

sunku do bieguna magnetycznego w czasie ich powstawania jedynie wtedy, gdy owe skały pozostają dzisiaj dokładnie w tym samym położeniu, w jakim znajdowały się w momencie uzyskiwania swojej charakterystyki magnetycznej. Jeśli zostały sfałdowane lub wychylone, to interpretacja jest *znacznie* trudniejsza albo w ogóle niemożliwa. Co więcej, ponieważ kontynenty w czasie historii geologicznej wędrowały po całym globie, w wypadku bardzo starych skał nie da się nawet określić, czy ich namagnesowanie nastąpiło na półkuli północnej, czy południowej.

Czasami również skamieniałości dostarczają informacji o dawnym położeniu płyty. Argumenty Wegenera, dotyczące dryfu kontynentów, opierały się częściowo na skamieniałościach, sugerując, że niektóre kontynenty, dziś znajdujące się z dala od siebie, były kiedyś połączone. Skamieniałości mogą również wskazywać na szerokość geograficzną lub przynajmniej pozwolią na rozróżnienie środowisk tropikalnych, strefy umiarkowanej lub polarnej. Zapis kopalny jednakże dotyczy jedynie młodszych części historii geologicznej i nie jest użyteczny w przypadku prekambriu. Niewiele wiadomo na temat względnego położenia płyt, a nawet ich budowy w proterozoiku i archajku. Istnieją jednak, jak to pokazano w rozdziale 4, liczne ślady szwów kontynentalnych w prekambrze i muszą one oznaczać miejsca dawnych stref subdukcji, gdzie kontynenty lub ich fragmenty zderzały się ze sobą podczas zamykania się basenów oceanicznych. Skały występujące w tych strefach są podobne do opisanych z młodszych okresów geologicznych. Wskazówką decydującą w wielu takich strefach szwów jest obecność małych wycinków dna oceanicznego, nasuniętych na kontynent w czasie kolizji. To wyraźny dowód na to, że powstały one na krawędzi zbiegających się płyt, gdzie dno morskie ulegało subdukcji. Tak więc, choć nie brak sceptyków, większość geologów jest przekonana, że tektonika płyt od miliardów lat, a być może od samego początku historii Ziemi, działa z grubsza podobnie jak dzisiaj.

## ROZDZIAŁ 6

### OKRUCHY CZASU

W poprzednich rozdziałach wiele powiedziano o czasie. Geologia jest nauką historyczną, a więc czas ma dla niej zasadnicze znaczenie. Ziemia powstała 4,5 miliarda lat temu, Ocean Atlantycki zaczął się tworzyć około 200 milionów lat temu, dinozaury wymarły 66 milionów lat temu. Wszystkie te stwierdzenia podają dość precyzyjne daty ważnych wydarzeń w historii Ziemi. Czy możemy być pewni, że są one prawdziwe?

Już Grecy i Rzymianie wywnioskowali z obserwacji przyrody, że skały osadowe reprezentują długie odcinki czasu. Jednakże dopiero James Hutton, znamienity szkocki geolog, reprezentujący ideę uniformitaryzmu, pierwszy w czasach współczesnych przystąpił do przekonywania ludzi, że zapis skalny jest naprawdę dawny. Jego podejście było proste i w sposób klasyczny naukowe: obserwował zachodzące wokół procesy sedymentacji i zdał sobie sprawę, że są one ogólnie bardzo powolne. Wywnioskował więc, że odsłonięcia zlitfikowanych dziś osadów dużej miąższości, które obserwował w klifach, muszą odpowiadać bardzo długim okresom odkładania się osadów. Również Dar-win, dobrze znający ideę Huttona, stwierdził, że aby wyjaśnić procesy ewolucji biologicznej zawarte w zapisie kopalnym, niezbędne są bardzo długie odcinki czasu.

Żaden z tych dwóch ludzi, ani nikt im współczesny, przekonany o ogromnym wieku Ziemi i powolnym tempie zmian geologicznych, nie znał sposobu dokładnego określenia czasu geologicznego. Niemniej oceniano, że skala obejmuje setki milionów lat, co było wówczas podejściem rewolucyjnym. W tamtych latach wykształcenie wpływowej elity zakorzenione było w teologii i takie idee godziły w dosłowną interpretację Biblii. To właśnie opór ze strony Kościołów chrześcijańskich sprawił, że odrzucono greckie hipotezy dotyczące wieku osadów i skałmieniałości. Co więcej, podobnie jak hipoteza dryfu kontynentów Wegenera, koncepcja, że Ziemia jest tak stara, atakowana była przez innych naukowców. Szczególnie wpływową postacią był tu brytyjski fizyk lord KeMn, który udowadniał w końcu dziewiętnastego wieku, opierając się na wyliczeniach okresu stygnięcia Ziemi, że nie może ona liczyć więcej niż 40 milionów lat, a przypuszczalnie nawet 20 milionów lat. Jego argumenty wydawały się poprawne i geolodzy nie potrafili ich odeprzeć; przeczyli im jednak dowody geologiczne.

Jednym ze słabych punktów w argumentacji lorda KeMna było to, że Ziemia, o czym wiemy dzisiaj, zawiera pewną liczbę naturalnych izotopów promieniotwórczych. Ulegają one powolnemu rozpadowi, uwalniając ciepło i w efekcie wydłużając ochładzanie się Ziemi. Zjawisko promieniotwórczości nie było jednak znane w czasie, kiedy KeMn wykonał swoje obliczenia, nie mógł więc uwzględnić jego wpływu.

Istnieje zabawna historia dotycząca Ernesta Rutherforda, jednego z pionierów badań nad promieniotwórczością, związana z oceną wieku Ziemi dokonaną przez lorda KeMna. Rutherford wygłaszał kiedyś wykład na temat ciepła powstającego w procesie rozpadu promieniotwórczego; był zdenerwowany, ponieważ wśród słuchaczy znajdował się lord KeMn, ciągle bardzo wpływowa postać w brytyjskiej nauce. Chcąc być elegancki, oświadczył, że KeMn w rzeczywistości przewidział odkrycie promieniotwórczości, ponieważ jego wyliczenia wieku Ziemi zostały wykonane z zastrzeżeniem, że ich wynik byłby inny, gdyby stwierdzono istnienie nowego źródła wewnętrznego ciepła. Mówi się, że lord KeMn, mający wówczas 80 lat,

drzemał w czasie wykładu, lecz obudził się i szerokim uśmiechem skwitował komplement Rutherforda.

Poza wytwarzaniem ciepła we wnętrzu Ziemi, promieniotwórczość dostarcza również geologom całej serii niezawodnych „zegarów” do pomiaru wieku skał i tempa różnych procesów geologicznych. Lecz zanim przedyskutujemy szczegółowo, jak się to robi, warto przyjrzeć się sposobowi, w jaki oceniano wiek przed pojawieniem się datowania za pomocą rozpadu pierwiastków promieniotwórczych. Tak naprawdę, większość szczegółów ostatnich 550 milionów lat geologicznej skali czasu na rycinie 1.1, to jest cały fanerozoik, znana była na długo przedtem, zanim został określony rzeczywisty wiek granic. Względne położenie różnych jednostek było już znane, nie znano jednak czasu ich trwania.

Koncepcja czasu względnego jest prostym, lecz potężnym narzędziem służącym do określania relacji wiekowych pomiędzy różnymi jednostkami skalnymi, co stwierdzono już w rozdziale 4 i pokazano na rycinie 4.1. Podejście jest dość proste i często sprowadza się do zwykłego pytania, czy A jest starsze od B, czy na odwrót. Jeden z najbardziej oczywistych aspektów czasu względnego musiał być znany intuicyjnie od tysiącleci, lecz został przedstawiony w sposób formalny w siedemnastym wieku: w sekwencji warstw osadowych najmłodsza znajduje się na górze. Człowiekiem, który sformułował to prawo, był duński anatom, który żył we Włoszech i zlatinizował swoje skandynawskie nazwisko (Niels Stenson) na Nicolaus Steno. Steno wniósł ważny wkład do medycyny, jak również do geologii i mineralogii, lecz w wieku 37 lat, niestety, został księdzem i porzucił naukę. Wskazując na rzecz oczywistą - fakt, że osady odkładane w wodzie tworzą początkowo horyzontalne warstwy, niezależnie od ich obecnej orientacji, i że najmłodsze warstwy muszą się znajdować na górze - stworzył fundamenty geologicznej skali czasu.

Ziemia jest jednak miejscem dynamicznym i żadne pojedyncze odsłonięcie nie przynosi kompletnego, warstwa po warstwie, osadowego zapisu całego fanerozoiku. Jak jest więc możliwe skonstruowanie geologicznej skali czasu, nawet

w terminach czasu względnego? Odpowiedź daje ewolucja i ciągle zmieniająca się natura zespołów skamieniałości zachowanych w skałach osadowych. Faktycznie, ponad pół wieku przedtem, zanim Darwin opublikował swoją teorię ewolucji, angielski inżynier William Smith, wykonujący mapy kanałów południowej Anglii, narysował złożony, pionowy profil warstw osadowych znajdujących na różnych wysokościach w różnych miejscach. Dokonał tego na podstawie skamieniałości, a dokładniej zespołów skamieniałości występujących w różnych skałach osadowych. Mógł on stworzyć złożony profil, ponieważ w wielu miejscach osady częściowo się zazębiały. Łatwo to sobie wyobrazić, jeśli przyjąć, że pewne grupy skamieniałości w skałach osadowych oznaczone są literami alfabetu, gdzie A jest najstarsze (ryc. 6.1). Klif w jednym miejscu może odsłaniać warstwy osadowe zawierające skamieniałości grup A, B, C i D, w innym miejscu obecne będą grupy C, D i E, a w jeszcze innym - grupy C, E, F i G. Przez łączenie tych samych grup skamieniałości w różnych miejscach, można utworzyć całą sekwencję pionową, tak jakby wszystkie osady występowały w jednym miejscu. I zgodnie z zasadą Steno najstarsze skały znajdują się na dole, a najmłodsze na górze. Z tego prostego przykładu wynika, że choć nigdy grup A i B nie znaleziono w tych samych miejscach, co grup F i G, to F i G są młodsze - wynika to ze złożonej, względnej skali czasu. Wiemy również, że jeśli któraś z tych grup skamieniałości została by znaleziona gdziekolwiek na świecie, może być umieszczona we właściwym w stosunku do innych grup miejscu na ewolucyjnej skali czasu.

Zasadniczo ta procedura została użyta do tworzenia względnej skali czasu, przedstawionej na rycinie 1.1, bez podawania rzeczywistego wieku. Nie było to, oczywiście, tak proste, jak można by sobie wyobrazić z podanego wyżej przykładu. Choć ta skala czasu zawiera dane z szeroko rozrzuconych miejsc, istnieją pewne części zapisu geologicznego, które są bardzo słabo reprezentowane przez osady na całej kuli ziemskiej. Dzieje się tak, ponieważ w wyniku tektoniki płyt większość skał osadowych złożonych w oceanach została

w przeszłości zniszczona - pochłonięta przez strefy subdukcji albo zmetamorfizowana tak dalece w strefach kolizji między kontynentami, że nie sposób ich rozpoznać. A osady, które się zachowały, zwykle te złożone wzdłuż krawędzi kontynentów lub w płytkich morzach epikontynentalnych, wykazują różnicowanie geograficzne w zespołach skamieniałości, tak

jak dziś istnieją wyraźne różnice między florą i fauną, powiedzmy, raf koralowych otaczających tropikalną wyspę na Pacyfiku a florą i fauną wód Atlantyku wokół Islandii. Lecz nieustannie zachodząca ewolucja i podobieństwo, jeśli nie

identyczność, wielu gatunków, przekraczające w pewnych momentach granice geograficzne, uczyniły to podejście nadzwyczaj skutecznym.

Datowanie względne za pomocą skamieniałości pozwoliło pierwszym geologom odtworzyć sekwencje głównych wydarzeń, które nastąpiły w czasie fanerozoiku. Wiedzieli oni na przykład, że na Ziemi pojawiły się ryby, zanim żyły na niej dinozaury lub ssaki. Potrafili stwierdzić, że ogromne pokłady węgla we wschodniej części Ameryki Północnej i w Europie Zachodniej powstały w dawnych bagniskach na długo przedtem, zanim utworzyły się na dnie oceanów osady kredowe tworzące dziś Białe Klify w okolicy Dover. Lecz byli oni zupełnie zagubieni, mając do czynienia ze skałami bez skamieniałości, szczególnie prekambryjskimi. Przypuszczali, że większość silnie zmetamor-fizowanych skał jest starsza od tych, które są mniej zdeformowane i zmienione. Nie było jednak sposobu, aby stwierdzić, czy skały w Indiach są starsze od podobnych w Kanadzie, czy odwrotnie. Nic również nie wskazywało na to, że względna skala czasu, którą tworzą fanerozoiku, obejmowała w rzeczywistości zaledwie 12% czasu geologicznego. A nawet tam, gdzie względne następstwo znano wystarczająco dobrze, nie sposób było ocenić czas trwania różnych części skali. Ta możliwość pojawiła się znacznie później, właściwie dopiero w drugiej połowie dwudziestego wieku, i jest ciągle udoskonalana.

## **Datowanie za pomocą pierwiastków promieniotwórczych**

Strażnikiem czasu par *excellen.ce* są dla geologów pierwiastki promieniotwórcze. Na szczęście istnieje w przyrodzie wiele promieniotwórczych izotopów o właściwościach, które czynią je użytecznymi w chronologii geologicznej. Ich znaczenia nie można

przecenić. To dzięki nim zdołano odtworzyć historię Ziemi przedstawioną w tej książce.

W jaki sposób pierwiastki promieniotwórcze służą do *oznaczenia* wieku lub stworzenia skali czasowej? Problem ten jest bardzo skomplikowany i wysoce techniczny; napisano na ten temat tysiące publikacji naukowych i wiele książek. Na nasze potrzeby wystarczy krótki zarys z kilkoma przykładami. Podstawowe przesłanki są jednak naprawdę dość proste: izotopy promieniotwórcze ulegają rozpadowi ze stałą prędkością. W tym znaczeniu są one dokładnymi odpowiednikami zwykłych zegarów. Wiemy, że w ciągu każdej minuty zegar odlicza sześćdziesiąt sekund. Wiemy również, że w każdej próbce zawierającej uran około 1,5% zawartych w niej atomów uranu <sup>238</sup> ulegnie rozpadowi, tworząc ołów w ciągu 100 milionów lat. Mierząc ilość uranu, która uległa rozpadowi podczas istnienia jakiejś próbki (lub, inaczej, ilość ołowiu, która powstała w wy-

niku rozpadu), można oznaczyć jej wiek.

Większość pierwiastków chemicznych z tabeli okresowej ma kilka izotopów. Jak to opisano w rozdziale 2, wszystkie izotopy pierwiastków mają zasadniczo tę samą charakterystykę chemiczną - tę samą liczbę protonów w jądrze i tę samą liczbę elektronów otaczających to jądro; różnią się jednak nieco masą, ponieważ każdy zawiera inną liczbę neutronów. Izotopy identyfikuje się na podstawie liczby, określającej sumę protonów i neutronów w jądrze (a tym samym jego masę). Tak więc w każdym łyku powietrza, którym oddychamy, większość atomów tlenu to tlen 16, lecz niektóre to tlen 18, a jeszcze mniej licznie występuje tlen 17.

Izotopy promieniotwórcze są nietrwałe. Rozpad promieniotwórczy prowadzi do stabilności, zmieniając stosunek neutronów i protonów w jądrze. Zachodzi to w wyniku wyrzucania z wysoką energią cząstek z jądra; w efekcie powstaje inny pierwiastek chemiczny - stwierdziliśmy na przykład, że w wyniku rozpadu uranu powstaje ołów (choć w tym szczególnym wypadku transformacją obejmuje całą serię rozpadów promieniotwórczych, a nie tylko jeden etap). Zjawisko promieniotwórczości odkryte zostało w ostatnich latach dziewiętnastego wieku i od

tego czasu jest intensywnie badane. Eksperymentalnie szybko stwierdzono, że promieniotwórczość jest zjawiskiem statystycznym, to *znaczy* każdy izotop promieniotwórczy charakteryzuje prawdopodobieństwo, że ulegnie rozpadowi w określonym czasie. Wyobraźmy sobie dużą liczbę takich izotopów w naczyniu. Jeśli będziemy obserwować je przez pewien okres, powiedzmy przez minutę, część atomów ulegnie rozpadowi; w ciągu następnej minuty ulegnie rozpadowi część pozostałych atomów i tak dalej. Ponieważ jest to zjawisko statystyczne i, szczególnie gdy liczba atomów w naczyniu była początkowo mała, część, która ulega rozpadowi, może się nieco różnić w tej czy innej minucie; przeciętnie jednak będzie ona taka sama. Przeprowadzany w różnym czasie i w bardzo różnych warunkach środowiskowych eksperyment dałby taki sam rezultat. Świadczy to o tym, że prawdopodobieństwo rozpadu danego izotopu jest stałą. Stałą rozpadu najłatwiej chyba określać terminem okresu pół-rozpadu, czyli czasu koniecznego, aby połowa początkowo obecnych w próbce atomów uległa rozpadowi. W terminach matematycznych okres półrozpadu jest bezpośrednio związany ze stałą półrozpadu i został on dość dokładnie zmierzony dla większości izotopów promieniotwórczych. To właśnie ta wiedza stanowi klucz do wszystkich „bezwzględnych” metod datowania stosowanych w geologii.

Być może zauważyliście, że rozpad promieniotwórczy ma charakter wykładniczy, co oznacza, że rzeczywista liczba atomów ulegających rozpadowi jest początkowo duża i z czasem staje się coraz mniejsza. To tylko część ulegająca rozpadowi w danym odcinku czasu pozostaje ta sama, jak to pokazano na rycinie 6.2.

W rzeczywistości w przyrodzie występuje wiele izotopów

promieniotwórczych, więcej niż przypuszczamy. Również wiele występujących w środowisku zostało stworzonych przez człowieka w bombach jądrowych i reaktorach. Niektóre z nich są używane w badaniach geologicznych, lecz nie będziemy się nimi zajmowali w tym rozdziale.

Dlaczego nietrwałe izotopy promieniotwórcze istnieją w przyrodzie? Większość z nich, wraz z trwałymi pierwiastkami, po-

wstała w reakcjach jądrowych we wnętrzu gwiazd lub podczas wybuchów supernowych, które zdarzają się regularnie w naszej Galaktyce. Stanowiły one część materiału włączanego do Ziemi w momencie jej powstania, a pierwiastki o bardzo długim okresie półrozpadu rozpadły się tylko częściowo i ciągle

znajdujemy je na Ziemi. Są jednak inne izotopy z okresem półrozpadu tak krótkim, że każda ich ilość obecna w momencie tworzenia się Ziemi uległaby dawno rozpadowi. Fakt, że nadal istnieją, *oznacza*, iż musiały powstać w jakimś innym, ciągle trwającym procesie.

Dobrym przykładem jest węgiel 14, izotop używany do datowania węglowego. Ma on krótki (w sensie geologicznym) okres półrozpadu, wynoszący około 5700 lat, a zatem żadna ilość węgla 14 dziś obserwowana nie może być pozostałością z czasu powstawania Ziemi (co wynika z ryc. 6.2). Ilość tego izotopu na naszej planecie jest w sposób ciągły uzupełniana w wyniku reakcji jądrowych w atmosferze. To niezwykle szczęśliwa okoliczność z punktu widzenia archeologów i klimatologów, powszechnie wykorzystujących węgiel 14 do datowania.

Reakcje jądrowe wytwarzające węgiel 14 w atmosferze powodowane są promieniowaniem kosmicznym, jak nazywa się cząstki - najczęściej pojedyncze atomy - wypełniające przestrzeń i uderzające w Ziemię. Wiele z nich pochodzi z naszego Słońca, skąd wyrzucane są w przestrzeń w dużych ilościach, gdy wielkie języki ognia podczas wybuchów tryskają miliony kilometrów ponad słoneczną powierzchnię. Inne cząstki, niosące jeszcze większą energię, są podróżnikami z odległych obszarów spoza Układu Słonecznego. Gdy rozpedzone cząstki promieniowania kosmicznego, niezależnie od pochodzenia, zderzają się z atomami ziemskiej atmosfery, zachodzi reakcja jądrowa, podobnie jak to się dzieje w wybudowanych przez człowieka akceleratorach cząstek. Produktem ubocznym wielu tych reakcji są neutrony, i w momencie gdy taki neutron uderza i zostaje przechwycony przez jądro trwałego atomu azotu 14 (azot jest najpospolitszym pierwiastkiem w atmosferze), wybijając podczas zderzenia proton, powstaje promieniotwórczy węgiel

C14.

Większość węgla w ziemskiej atmosferze jest połączona z tlenem, tworząc cząsteczkę dwutlenku węgla. Taki los czeka również atomy węgla  $^{14}$  tworzone przez promieniowanie kosmiczne, tak że w każdej próbce dwutlenku węgla z atmosfery istnieje stała ilość atomów węgla  $^{14}$ . Ponieważ węgiel w organi-

zmach żywych, dzięki fotosyntezie roślin, zawsze pochodzi z atmosfery, zawiera również tę stałą ilość węgla  $^{14}$ . To właśnie stanowi podstawę użycia tego izotopu promieniotwórczego jako chronometru.

Datowanie za pomocą węgla  $^{14}$  zastosowano do określenia wieku całunę turyńskiego, muszli ze smietnisk Indian północnoamerykańskich i stwierdzenia wieku prehistorycznych erupcji wulkanicznych na Hawajach. W jaki więc sposób datuje się tą techniką rzeczywiste próbki? Po pierwsze, trzeba znaleźć materiał, który włączał dwutlenek węgla (a tym samym węgiel  $^{14}$ ) z atmosfery. Wszystko, co zawiera węgiel i było żywe w czasie zdarzenia podlegającego datowaniu, nadaje się do tego celu, choć niektóre substancje są bardziej przydatne niż inne. Często używa się zachowanego materiału roślinnego, takiego jak drewno lub węgiel drzewny. Obumarła roślina lub drzewo, ścięte, spalone czy też pogrzebane przez potok lawy, przestaje pobierać węgiel z atmosfery; od tego momentu zawarty w nim węgiel  $^{14}$  podlega rozpadowi, zgodnie z dobrze znaną stałą rozpadu, jak przedstawia rycina 6.2. Jeśli stara próbka drewna liczyłaby dokładnie tyle, ile wynosi okres półrozpadu węgla  $^{14}$  - czyli 5700 lat - zawierałaby 50% węgla  $^{14}$  znajdującego w dzisiejszych roślinach. Jeśli jej wiek wynosiłby dwa okresy półrozpadu, zawierałaby 25% i tak dalej. Jak wynika z ryciny 6.2, po kilku okresach półrozpadu pozostaje bardzo niewiele izotopu promieniotwórczego. Jednakże współczesna technika pozwala wykryć niezwykle małe ilości węgla  $^{14}$ , zmierzyć wiek próbki liczącej 40 lub 50 tysięcy lat. Jest to więcej niż osiem okresów półrozpadu, a zatem w próbce tego wieku pozostaje mniej niż  $1/256$  pierwotnej zawartości węgla  $^{14}$ .

Niepewna w tej metodzie jest tylko ilość węgla  $^{14}$  w dawnej atmosferze - mogła ona być różna od dzisiejszej. Istnieją jednak różne sposoby sprawdzenia takiej możliwości - można na przykład kalibrować wiek uzyskany za pomocą węgla  $^{14}$  innymi technikami datowań. Choć stwierdzono małe odchylenia, ogólnie rzecz biorąc założenie o mniej więcej stałej ilości węgla  $^{14}$  w atmosferze sprawdza się dobrze w skali czasu dającego się badać tą metodą.

Ten krótki opis dostarcza przykładu, w jaki sposób izotopy promieniotwórcze mogą być użyte do pomiaru wieku obiektów lub zdarzeń. Okres półrozpadu węgla  $^{14}$  jest jednak tak krótki, że czyni go przydatnym tylko do określenia chronologii niezbyt odległej przeszłości. Dla reszty geologicznej skali czasu stosuje



się izotopy promieniotwórcze o znacznie dłuższym czasie pół-rozpadu i robi się to nieco inaczej.

W rozdziale 2 wspomnieliśmy o izotopach ołowiu i ich przydatności do wyznaczania wieku Ziemi i datowania odpornych na wietrzenie minerałów, cyrkonu. Zauważyliśmy, że różne izotopy ołowiu są trwałymi produktami końcowymi rozpadu promieniotwórczego uranu i toru. Metoda uranowo-ołowiowa była w rzeczywistości pierwszą techniką zastosowaną do oznaczenia wieku skał za pomocą rozpadu promieniotwórczego i ciągle należy do najbardziej użytecznych w geologii. Inne powszechnie stosowane pary izotopów obejmują rozpad izotopu potasu do izotopu argonu i rozpad rubidu  $^{87}\text{Rb}$  do strontu  $^{87}\text{Sr}$ . W każdym z tych wypadków pierwotny izotop jest szeroko rozprzeszczonym składnikiem skał skorupy ziemskiej i ma okres półrozpadu wystarczająco długi, aby metodą tą objąć cały okres historii Ziemi.

Zasadniczo metody wykorzystujące długotrwałe izotopy promieniotwórcze są podobne do datowania za pomocą węgla  $^{14}\text{C}$ , istnieją jednak również ważne różnice. Jedną z nich wynika stąd, że izotopy pierwotne nie powstają na Ziemi w sposób ciągły, lecz ich ilość stopniowo zmniejsza się na skutek rozpadu promieniotwórczego. Tak więc dziś na Ziemi jest znacznie mniej uranu niż w czasie jej powstawania; większość uranu rozpadła się, pozostawiając ołów.

W większości powszechnie stosowanych metod datowania procedura polega raczej na pomiarze ilości izotopu, będącego produktem rozpadu, wytworzonego w określonym czasie, a nie na pomiarze ilości pierwotnego izotopu promieniotwórczego pozostałego w próbce, jak w wypadku węgla  $^{14}\text{C}$ . Dzięki temu nie musimy wiedzieć, ile pierwotnego izotopu występowało w próbce, kiedy zaczął działać promieniotwórczy zegar. Ponieważ z każdego pierwotnego atomu powstaje atom potomny, liczba

atomów potomnych jest zawsze równa liczbie atomów pierwotnych, które uległy rozpadowi.

Metoda datowania potas-argon stanowi dobry przykład. Potas  $^{40}\text{K}$  jest jedynym promieniotwórczym izotopem spośród trzech izotopów potasu występujących w przyrodzie. Choć potas  $^{40}\text{K}$  nie występuje zbyt często, stanowiąc około 0,01% ilości tego pierwiastka, to jednak potas jest pospolity w minerałach skorupy ziemskiej. Można więc tą techniką datować wiele rodzajów skał. Okres półrozpadu potasu  $^{40}\text{K}$  wynosi 1,3 miliarda lat, czyniąc go użytecznym w datowaniach skał tak starych jak Ziemia i młodszych, liczących 100 tysięcy lat lub nawet mniej. Izotopem potomnym tego rozpadu jest argon  $^{40}\text{Ar}$ , będący gazem, i choć argon nie jest rzadkim pierwiastkiem (stanowi około jednego procenta atmosfery), większość skał magmowych, szczególnie wulkanicznych, które wylały się na powierzchnię Ziemi w momencie swego powstania, nie zawiera zupełnie argonu  $^{40}\text{Ar}$ . Argon rozpuszczony w stopionej lawie po prostu ulatnia się do

atmosfery w czasie wylewu. Tak więc cały argon  $^{40}$  obecny w starych skałach wulkanicznych musi pochodzić z rozpadu promieniotwórczego potasu  $^{40}$  w czasie istnienia próbki. Ponieważ okres półrozpadu jest dobrze znany, prostą sprawą jest wyliczenie czasu wymaganego do nagromadzenia się danej ilości argonu. Niektóre pospolite minerały, takie jak skaleni i muskowit, są bogate w potas i stanowią szczególnie czułe chronometry.

Inne długotrwałe izotopy promieniotwórcze używane są w geochronologii w analogiczny sposób, choć każdy z nich ma swoje specyficzne właściwości. Ponieważ metody te dotyczą różnych pierwiastków chemicznych, niektóre okazują się lepsze od innych w datowaniu poszczególnych typów skał. Często zdarza się jednak, że ta sama skała może być datowana za pomocą kilku technik. Choć izotopy promieniotwórcze w próbce mogą mieć zupełnie różne okresy półrozpadu, a pierwotne i wtórne pierwiastki całkowicie odmienne właściwości chemiczne, wiek określony na ich podstawie jest na ogół ten sam. Wiemy więc na pewno, że datowania są trafne, a odpowiednie okresy półrozpadu - wyznaczone dokładnie.

Lecz co tak naprawdę podlega datowaniu? Podany wyżej przykład skały wulkanicznej, w której argon  $^{40}$  gromadzi się od czasu wylewu, jest dość prosty: oznaczamy czas wylewu odpowiadający wiekowi skały wulkanicznej. A co ze skałami osadowymi lub metamorficznymi? Czy dotyczą ich te same prawa? Odpowiedź brzmi: i tak, i nie.

Weźmy za przykład skałę osadową. Przypuśćmy, że aby wykonać datowanie za pomocą metody potasowo-argonowej, wyizolowano minerał bogaty w potas i obliczono jego wiek na 300 milionów lat. Czy jest to czas, kiedy złożony został osad? Zazwyczaj odpowiedź brzmi: nie, ponieważ wiele minerałów występujących w osadach to fragmenty wcześniej istniejących skał. Zostały one przeniesione z pierwotnego źródła do miejsca depozycji przez rzeki i prądy oceaniczne. Wiek ziarna mineralnego bogatego w potas jest najprawdopodobniej poprawny, lecz przypuszczalnie oznacza czas tworzenia się granitu, z którego pochodzi, a nie czas złożenia ziarna jako części skały osadowej. Można tylko powiedzieć, że skała osadowa nie może być starsza niż 300 milionów lat. Musi ona być młodsza niż jej składniki, o ile młodsza, trudno często stwierdzić.

Skały metamorficzne nastęrczają jeszcze więcej trudności. Wszystkie techniki datowania są w pewnym stopniu czułe na temperaturę, szczególnie metoda potasowo-argonowa. Jeśli minerał bogaty w potas zostanie podgrzany, to najprawdopodobniej część nagromadzonego w nim argonu  $^{40}$  ulotni się do atmosfery. Ponieważ metamorfizm niezmiennie przebiega w podwyższonych temperaturach, większość skał traci w tym czasie część swojego argonu. Jeśli utrata jest całkowita, radioaktywny zegar zostaje wyzerowany, a zmierzony wiek odpowiada czasowi metamorfizmu. Najczęściej jednak utrata bywa częściowa, a co więcej, zwykle nie jest możliwe oznaczenie, ile argonu zostało

usunięte. Czasami ten problem można rozwiązać dzięki zastosowaniu kilku różnych technik lub analizie minerałów mających różną czułość na temperaturę. Uzyskana informacja jednak nie zawsze jest łatwa do zinterpretowania. Pomimo to w ostatnich latach dokonano wielkich postępów w wyjaśnieniu zachowania się w czasie podgrzania takich pier-

wiąstków, jak argon, w różnych minerałach. W niektórych wypadkach możliwa jest nawet - na podstawie szczegółowej analizy składu izotopowego - rekonstrukcja historii temperaturowej skały. Podejście to było szczególnie owocne w badaniach historii łańcuchów górskich, takich jak Himalaje, gdzie skały głęboko położone pod powierzchnią (a tym samym bardzo gorące) zostały wyniesione do chłodniejszych rejonów blisko powierzchni, gdzie rozpoczął się proces gromadzenia argonu. W pewnych wypadkach wiek takiego wyniesienia może być dość dokładnie wyznaczony.

### **Pośrednie metody datowania**

W wielu sytuacjach możliwe staje się określenie wieku skały bez bezpośredniego pomiaru pierwotnych i wtórnych izotopów. Dotyczy to przede wszystkim skał osadowych, które, jak wykazaliśmy wyżej, nie poddają się bezpośrednim pomiarom wieku. Często osady mogą być datowane pośrednio, czasami dość precyzyjnie, za pomocą skamieniałości.

Skamieniałości to zachowane szczątki żyjących niegdyś organizmów. Niekiedy są to tylko fragmenty miękkich tkanek, które uległy rozkładowi, jak w wypadku wielu skamieniałości roślin. *Znacznie* częściej są to twarde części organizmów - muszle, zęby, kości. Niestety, zwykle żadne z nich nie zawierają dużych ilości izotopów promieniotwórczych używanych w datowaniu, a co więcej, skład chemiczny skamieniałości często zmienia się zupełnie wskutek cyrkulacji wody długo po ich złożeniu, choć nie powoduje to wielu *zmian* w wyglądzie *fizycznym*. Skoro jednak życie ewoluuje, skamieniałości są naturalnymi chronometrami, ponieważ ich morfologia i inne cechy zmieniają się w czasie. Jeśli można określić czas, w którym jakiś organizm lub grupa organizmów żyła na Ziemi, wówczas ich pojawienie się jako skamieniałości w skale automatycznie ją datuje.

Na szczęście istnieją składniki osadów, dające się dokładnie datować, tak więc możliwe było dość dokładne określenie wie-

ku większości skamieniałych organizmów, nawet jeśli nie udało się datować samych skamieniałości. Wybuchowe erupcje wulkanów wytwarzają na przykład wielkie chmury popiołów, które opadają w geologicznie krótkim odcinku czasu, tworząc warstwy piaszczystej skały i okruchów mineralnych. Mogli to stwierdzić ku swemu niezadowoleniu mieszkańcy stanu Wa-

szyngeon po wybuchu wulkanu St. Helens w 1980 roku. Geologów jednak cieszą warstwy popiołu, ponieważ stanowią one dobre warstwy przewodnie w niczym skądinąd nie wyróżniających się osadach. Minerale zawarte w popiołach mogą być często datowane takimi metodami, jak technika potasowo-argo-nowa, pozwalając dokładnie określić wiek pewnych odcinków kolumny osadów. W ten sposób warstwy popiołów, i innych dających się datować składników osadów, utworzyły skalę czasową dla skamieniałości dzięki dokonany na całym świecie tysiącom analiz. To właśnie w ten sposób przypisano wiek do geologicznej skali czasu z ryciny 1.1; wcześniej, zanim odkryto promieniotwórczość, istniała ona jako następstwo względne. Dokładny wiek niektórych granic na skali czasu jest uściślany nawet dzisiaj w szczegółowych badaniach łączących analizę zespołów skamieniałości z precyzyjnym datowaniem takich składników, jak warstwy popiołów.

Jeszcze inną pośrednią metodą datowania, o której mówiliśmy w poprzednim rozdziale, oparta jest na okresowej zmianie biegunowości ziemskiego pola magnetycznego. Analiza wieku potoków bazaltów na kontynentach (za pomocą izotopów promieniotwórczych, jak to wyżej opisano) i ich charakterystyka magnetyczna pozwoliły skonstruować dość szczegółową chronologię zamiany biegunów. Prawdę mówiąc, jest ona tak szczegółowa, że wiek różnych części dna morskiego można określić po prostu przez porównanie obrazu namagnesowania dna morskiego, przypominającego paski zebry, z datowanymi sekwencjami z kontynentu.

Chronologia magnetyczna nie jest ograniczona do skał magmowych. Podobnie jak bazalty dna morskiego, również osady zawierają składniki magnetyczne, które w miarę powolnego osadzania się na dnie oceanu układają się zgodnie z dominu-

jącym polem magnetycznym. Tak więc zamiana ziemskich biegunów magnetycznych jest również zapisana w osadach i ponownie, poprzez krzyżową korelację ze znaną, nową chronologią, oznaczyć można wiek osadów na podstawie wzoru namagnesowania.

Geolodzy włożyli wiele wysiłku, aby określić i uściślić skalę czasu w ziemskiej historii. Niepewność najlepszych datowań dawnych skał prekambryjskich wynosi mniej niż jeden procent, co oznacza, że wydarzenia, które nastąpiły w ciągu kilku milionów lat, mogą zostać ustawione we właściwej kolejności nawet w skałach liczących 3 miliardy lat. Jest to naprawdę godny odnotowania wyczyn. Odpowiada mu ustalenie następstwa zdarzeń, które zaszły w ciągu kilku godzin rok temu, na podstawie konsekwencji tych zdarzeń dzisiaj. Istotne jest również to, że znamy dziś dość dokładnie tempo ewolucji, wiemy, kiedy wymarły dinozaury, i potrafimy określić ramy czasowe rozdzielania się i zderzania kontynentów. Cała ta wiedza została zgromadzona za pomocą omawianych w tym rozdziale zegarów

promieniotwórczych. Ilekroć w tej książce mówimy o wieku, jest on zawsze oparty na tych samych geologicznych strażnikach czasu.

## ROZDZIAŁ 7

### EKSPLOZJA KAMBRYJSKA

Po niezbędnym wyjaśnieniu zagadnienia tektoniki płyt i czasu geologicznego powracamy do głównego wątku: historii Ziemi, o której opowieść przerwaliśmy w końcu protero-zoiku. Następną dużą jednostką czasu geologicznego (ryc. 1.1) jest era paleozoiczna, która rozpoczęła się około 540 milionów lat temu okresem kambryjskim. Ściślej mówiąc, nie jesteśmy pewni dokładnego wieku granicy proterozoik-kambr. Nawet ostatnie oceny podają wiek od 530 do 600 milionów lat. Taka różnorodność jest częścią naturalnego postępu w nauce i bynajmniej nie oznacza nieudolności badaczy. Powodem są zarówno problemy techniczne, związane z datowaniem skał, jak i fakt, że - skoro nie wszystkie skały mogą być datowane - trudno znaleźć odpowiednie próbki na granicy lub w jej pobliżu. Istnieje również problem, gdzie dokładnie postawić *fizyczną* granicę w konkretnej sekwencji skał osadowych. Podana tutaj liczba 540 milionów lat oparta jest na starannym datowaniu uranowo-ołowiowym kryształów cyrkonu, wydobytych z warstwy wulkanicznego popiołu występującego w osadach prowincji Yunnan w Chinach. Nie ma wątpliwości, że wiek po-

popiołu został wyznaczony dokładnie. Niepewne jest jedynie położenie tej warstwy w stosunku do rzeczywistej granicy. Paleontolodzy wywnioskowali na podstawie skamieniałości, że osady

bezpośrednio ponad i poniżej warstwy popiołu zostały złożone bardzo blisko początku kambru. Niezależnie jednak od ich dokładnego wieku, poczynając od kambru historia geologiczna jest nierozłącznie powiązana z historią życia na Ziemi; to opowieść, która przemawia poprzez skamieniałości występujące w skałach.

540 milionów lat temu nie znano TNT (trójnitrotoluenu, czyli trotylu) i eksplozja, o której mówią geolodzy, nie była zjawiskiem tak gwałtownym, jak by wynikało z tego określenia. To raczej bardzo szybki, wprost zdumiewający wzrost różnicowania organizmów żywych na Ziemi. Większość z tych stworzeń wymarła i wiedzę o nich czerpiemy tylko ze skamieniałości.

## Zapis kopalny

Skamieniałości, które służą geologom do śledzenia dróg ewolucji i odczytania dawniej panującego klimatu, występują pod różnymi postaciami. Niektóre zachowały się w niemal oryginalnym stanie, na przykład szkielety tygrysów szablastozębnych wydobyte z naturalnych jeziorzek asfaltowych z rancza La Brea w Los Angeles, lecz większość, nie zmieniając swego zewnętrznego wyglądu, uległa zmianie w wyniku reakcji chemicznych. Najczęściej spotykanymi skamieniałościami są twarde części zwierząt zbudowane z pospolitych minerałów - fosforanowe kości lub zęby, muszle z węglanu wapnia. Tkanki miękkie ulegają zwykle rozkładowi zbyt szybko, aby pozostawić wiele śladów, choć w pewnych środowiskach mogą się zachować. Jest to bardzo szczęśliwa sytuacja, ponieważ większość prekambryjskich i wczesnokambryjskich zwierząt nie miała szkieletu, a ich skamieniałości odgrywają zasadniczą rolę w zrozumieniu natury eksplozji kambryjskiej.

Reakcje chemiczne, które często radykalnie zmieniają mineralny i chemiczny skład skamieniałości, zarówno części twardej, jak i tkanek miękkich, zwykle pozostawiają nietkniętą morfologię i strukturę wewnętrzną rośliny i zwierzęcia. Zachodzą one zazwyczaj po pogrzebaniu w osadzie, kiedy migrujące wody, niosące rozpuszczone minerały, reagują z oryginalnym materiałem, przekształcając go. Dobrym przykładem jest tu skamieniałe drewno zachowujące w szczegółach swoją oryginalną charakterystykę, na przykład pierścienie przyrostów, chociaż celuloza i inne składniki pierwotnego drzewa zostały

całkowicie zastąpione krzemionką. - związkami, który buduje pospolity minerał - kwarc. Zgodnie z nazwą, drewno zostało zamienione w kamień.

Niektóre z bardzo użytecznych skamieniałości nie są wcale szczątkami organizmów; to ślady rycia robaków, zadrapania dokonane przez kraby lub tropy dinozaurów. Podobnie jak doświadczony zwiadowca odgaduje płeć, wzrost i wagę właściciela niewyraźnych odcisków stóp, paleontolodzy zdobyli ogromną ilość informacji o dawnych organizmach i ich zachowaniu na podstawie skamieniałości śladów. Ich praca jest *znacznie* trudniejsza niż zadanie zwiadowcy, przede wszystkim dlatego, że w wielu wypadkach nie jest zupełnie jasne, jakie zwierzę pozostawiło te ślady.

Jako student geologii nie byłem miłośnikiem paleontologii. Pamiętam długie zimowe piątkowe popołudnia spędzone w przegrzonym pokoju starego budynku, kiedy rysowałem skamieniałości dawnych stworzeń pod kierunkiem życzliwego, lecz jednocześnie sędziwego instruktora. Nie przywiązywał wagi do behawioru, ewolucji czy procesów chemicznych, interesowała go wyłącznie klasyfikacja. Geofizyka i geochemia wydawały mi się wówczas znacznie bardziej interesujące; poza tym nie byłem nigdy zbyt zadowolony z własnych rysunków. Lecz gdy myślę o tym teraz, sądzę, że właściwie trudno o bardziej ekscytujące przeżycie niż to, gdy mając w ręce liczącą sobie 500 milionów lat skałę, wydobywamy z niej skamieniałości jakiegoś nieznanego stworzenia, próbując zrekonstruować świat sprzed pół miliarda lat. Tym właśnie zajmują się paleontolodzy. W wielu wypadkach potrafili oni odczytać sposoby poruszania się skamieniałych zwierząt z początków kambru, odżywiania oraz ich miejsce w ogólnym schemacie ewolucji.

W niektórych częściach świata bardzo trudno uniknąć oglądania skamieniałości, nawet jeśli jest się słabym obserwatorem.

Podczas podnoszenia kamyka na plaży, przechadzki po okolicy lub nawet wizyty w banku - jeśli budynek wykonano z osadowych skal, takich jak wapień - możemy zetknąć się ze skamieniałościami. Liczne skamieniałości pojawiają się wraz z nastaniem kambru; przez długi czas myślano, że wynika to jedynie z tego, iż w tym właśnie momencie ziemskiej historii zwierzęta wytworzyły twarde części. Lecz dziś już wiadomo, że to tylko część prawdy. Pewne jednostki skalne wieku kambryjskiego przepełnione są skamieniałymi zwierzętami, które nie miały muszli, kości ani zębów, ale wyłącznie tkanki miękkie. Zwykle taki materiał ulega bardzo szybko zniszczeniu, lecz w pewnych okolicznościach, gdy na przykład został szybko pogrzebany w środowisku zawierającym bardzo mało wolnego tlenu, nawet tkanki miękkie mogą ulec fosylizacji. Jeśli więc specjalne warunki geologiczne pozwoliły na zachowanie się takich skamie-

niałości z okresu kambryjskiego i późniejszych, to czemu nie ma wcześniejszych? Wydaje się, że niewiele mogło się zachować. Zróżnicowanie zwierząt wielokomórkowych wzrosło ogromnie około 540 milionów lat temu, i to właśnie ta nagła zmiana w zapisie kopalnym wyznacza granicę pomiędzy proterozoikiem a kambrem. Nazywa się ją eksplozją kambryjską, gdyż rzeczywiście przypominało to eksplozję. Niektórzy badacze oceniają, że w kambrze powstało 100 typów zwierząt (typ to szeroka jednostka taksonomiczna w królestwie zwierząt, wyróżniana głównie na podstawie struktury ciała); dzisiaj istnieje zaledwie 30 typów. Niezależnie od tego, czy tak wielką liczbę wczesnych typów potwierdzą dalsze badania, faktem jest, że koniec proterozoiku zaznaczył się radykalną zmianą w życiu na Ziemi.

W rozdziale 3 stwierdziliśmy, że kopalny zapis życia w *rzeczywistości* rozpoczyna się na długo przed kambrem, w skałach sprzed 3,5 miliarda lat, i że istnieją wskazówki występowania jeszcze starszego życia, choć brak niewątpliwych dowodów. Jednakże świadectwa sugerują, że tylko najprostsze jednokomórkowe organizmy zasiedlały Ziemię w ciągu długiego, liczącego ponad dwa miliardy lat odcinka historii geologicznej, który nastąpił po tych wczesnych przejawach życia. Bardziej złożone i ruchliwe zwierzęta pozostawiły ślady życia i tropy w mule, na-

wet jeśli ich miękkie ciała się nie zachowały. Takie zjawiska są częste w osadach kambryjskich i wcześniejszych, lecz wcześniejsze *zdarzają* się rzadko i nie występują w skałach liczących więcej niż miliard lat, choć pracownicy ich poszukiwano.

Pod koniec proterozoiku, lecz jeszcze przed właściwą eksplozją kambryjską, w oceanach pojawiła się pewna liczba zwierząt pozbawionych szkieletu. Ta grupa organizmów jest nazywana przez geologów fauną ediakariańską, od nazwy miejscowości Ediacara w Australii, gdzie po raz pierwszy owe skamieniałości znaleziono. Moment pojawienia się w zapisie kopalnym fauny ediakariańskiej nie został wyznaczony bardzo dokładnie, stało się to przypuszczalnie mniej niż 100 milionów lat przed początkiem okresu kambryjskiego. Długo przyjmowano, że fauna ediakariańska obejmowała przodków niektórych kambryjskich, a nawet współczesnych zwierząt. Natomiast pewne badania współczesne sugerują coś innego. Plan budowy tych zwierząt stanowi kategorię samą dla siebie, różnią się bowiem od wszelkich współczesnych lub kambryjskich organizmów. Skamieniałości świadczą, że zwierzęta ediakariańskie były przede wszystkim płaskimi stworzeniami podzielonymi na szereg segmentów (opisano je jako „pikowane”), które spoczywały na dnie morza niczym wiele małych dywanów. Wydaje się, że nie miały żadnych struktur wewnętrznych; niektórzy paleontolodzy *zaliczają je* do królestwa zwierząt zupełnie odrębnego od dziś żyjących. Jeśli ta interpretacja jest prawidłowa, wówczas zwierzęta ediakariańskie stanowią ślepe odgałęzienie drzewa ewolucyjnego, a ich nagłe pojawienie się, zróżnicowanie i zniknięcie ze światła-



wych oceanów to intrygująca zagadka paleontologiczna.

## Skamieniałości kambryjskie

Najwcześniejsze organizmy, mające zmineralizowane części ciała, a tym samym pozostawiające klasyczne skamieniałości, pojawiają się w kambrze. Najwcześniejsza ich grupa, zwana fauną tommocką (od piętrowej tommot na Syberii), stanowi początek eksplozji kambryjskiej i wydaje się pojawiać w zapisie skalnym

w pełni rozwinięta, *znacznie* zróżnicowana i pozbawiona oczywistych przodków. Lecz nawet owe skamieniałości są nieco tajemnicze, ponieważ ich prawdziwa natura nie jest dobrze rozumiana. Paleontolodzy nazywają je po prostu smaf *shelly fossils* (skamieniałości drobnoskorupkowe). Nie jest jasne, które z tych obiektów charakteryzujących się różnorodnością kształtów - są to małe stożki, okrągłe i spłaszczone czapki, małe zwinięte muszelki i wiele innych - są małymi częściami większych organizmów, które zaś głównymi częściami małych zwierząt. Pojawiają się dość nagle z początkiem kambru, szybko osiągają szczyt liczebności i zróżnicowania, aby potem równie szybko tracić na znaczeniu, zastępowane przez inne zwierzęta. Rozprzestrzeniły się one jednak i występują w skałach najwcześniejszego kambru na całej kuli ziemskiej.

Nawet geolodzy odczuwają od czasu do czasu potrzebę sprecyzowania takich słów, jak „szybko”, które padały w poprzednim akapicie. Rysujemy wykres pokazujący liczbę różnych form smaf *shelly fossils* w czasie i rzeczywiście widać na nim coś, co wydaje się nagłym pojawieniem i ekspansją, a następnie równie szybkim spadkiem w początkach okresu kambryjskiego. Powstanie i zniknięcie form to wąski, ostro zakończony pik na wykresie. Lecz ten mały punkcik obejmuje co najmniej 10 milionów lat. „Szybki” wzrost i rozprzestrzenienie się tych organizmów na całym globie nastąpiły przypuszczalnie w ciągu milionów lat. Milion lat to długi okres; kilka milionów lat temu na półkuli północnej rozpoczynała się ostatnia epoka lodowa (ciągle trwająca, o czym opowiem później), a nasz gatunek, *Homo sapiens*, jeszcze nie istniał. Dziesięć tysięcy lat temu, co stanowi tylko 1/100 miliona, ogromne, uzbrojone w ciosy mamuty wędrowały po Ameryce Północnej. Trzeba ciągłego wysiłku, aby utrzymać odpowiednią perspektywę w wypadku czasu geologicznego.

Tak więc rozprzestrzenienie się na całym globie zwierząt, które pozostawiły nam smaf *shelly fossils*, nie jest już tak godne uwagi, jak mogłoby się wydawać, gdy zdamy sobie sprawę ze skali czasu, w jakiej to nastąpiło. Również nasza planeta w początkach kambru bardzo się różniła od dzisiejszej. Choć

rekonstrukcją geografii świata w tak odległych czasach jest trudna, istnieje jednak dość wskazówek, jeśli chodzi o ogólne zarysy. Wiele z odrębnych dziś kontynentów - Afryka, Indie, Australia, Ameryka Południowa - stanowiły jedną masę lądową, co ułatwiało rozprzestrzenianie się małych morskich stworzeń w płytkich wodach wzdłuż krawędzi kontynentów. Jednakże Ameryka Północna i to, co dziś jest Syberią, wyraźnie były rozdzielone. Aby ułatwić wyobrażenie sobie tego, na rycinie 7.1 pokazano wygląd świata na początku okresu kambryjskiego.

Fauna *small shelly fossils* tomototu to tylko pierwsza fala eksplozji kambryjskiej. Większość głównych grup zwierząt bezkręgowych pojawia się wkrótce po niej. Są to stworzenia, takie jak gąbki i charakterystyczne dla kambru skamieniałe zwierzęta, zwane trylobitami. Choć dziś wymarłe, trylobity występowały bardzo licznie w morzach kambryjskich. W większości wypadków były one dość małe i nieskończona ilość ich odmian pełzała po dnie morskim, często pozostawiając ślady w miękkim mułku.

Również te ślady zachowały się jako skamieniałości. Trylobity miały twarde, zwapniałe, zewnętrzny szkielet, co bez wątpienia chroniło miękkie części ich ciała przed drapieżnikami; są one dobrze zachowane w wielu kambryjskich skałach osadowych. Trylobity są tak pospolite, że małe okazy można nabyć niedrogo w sklepach specjalizujących się w sprzedaży minerałów, skał i innych obiektów przyrodniczych. Dwa typowe kambryjskie trylobity przedstawiono na rycinie 7.2. Przez wiele lat małe trylobity z przyklejonymi magnesami służyły mi do przyczepiania dowcipów, rysunków dzieci i notatek na drzwiach lodówki, co wydaje się sromotnym końcem dla stworzeń z morza kambryjskiego. Dlaczego jednak w kambrze nagle zwierzęta wytworzyły zmineralizowane szkielety i twarde pancerze? I czemu zrobiły to w tak różnorodny sposób? Nawet ci, którzy zajmują się badaniem tych kwestii, nie potrafią jednoznacznie odpowiedzieć na to pytanie. Bez wątpienia zwierzęta o twardych pancerzach miały większą szansę przeżycia w zetknięciu z drapieżnikami.

A szkielety oraz sztywne zewnętrzne pokrywy mogły również ułatwiać przemieszczanie. Mineralami, z których kopalne organizmy budowały twarde części, są węgiel wapnia i fosforan wapnia. Sugerowano więc, że w pobliżu granicy proterozoiku i kambru nastąpiła zmiana składu chemicznego wody morskiej na powodujący łatwiejsze powstawanie tych minerałów. Trudno jednak sobie wyobrazić okoliczności, które prowadzą do takich zmian, nie zdarzyły się już wielokrotnie podczas poprzednich kilku miliardów lat historii Ziemi. Prawdopodobnie nie było jednej przyczyny eksplozji kambryjskiej; jej wystąpienie w owym momencie wynika z nałożenia się wielu czynników.

## Łupki z Burgess

Interesującym aspektem kambryjskiej historii, mającym ogromne znaczenie, jest to, że szybkie zróżnicowanie dotyczyło nie tylko zwierząt z twardymi częściami. Jeśli nawet skład wody oceanicznej dopomógł w rozwoju szkieletu i muszli, była to tylko jedna z przyczyn zdumiewającego zróżnicowania życia. Choć tradycyjny obraz ewolucji w kambrze oparty jest na zmi-neralizowanych skamieniałościach, w ostatnich latach wiele uwagi poświęcono znacznie rzadszym skamieniałościom stworzeń pozbawionych szkieletu. Zachowały się one w kilku miejscach, gdzie warunki geologiczne zapobiegły ich szybkiemu zniszczeniu. Najslawniejszym przypuszczalnie miejscem ich występowania są łupki z Burgess w Górach Skalistych na południu Kolumbii Brytyjskiej. Z jednego małego kamieniołomu pochodzą dziesiątki tysięcy skamieniałości reprezentujących oszałamiające bogactwo kształtów i form ciała, a ich badania dostarczyły paleontologom bezcennych informacji na temat przebiegu ewolucji biologicznej. Dwa z tych przedziwnych stworzeń pokazano na rycinie 7.3.

Fascynująca opowieść o odkryciu i badaniach skamieniałości z łupków z Burgess została wspaniale przedstawiona w książce, która dostarczyła tytułu dla trzeciego rozdziału, a mianowicie *Wonderful Life* S. J. Goulda. Jak już wspomnia-

no, Gould jest paleontologiem z Harvardu i z entuzjazmem pisze na temat wyraźnie bliski swemu sercu. Jeśli ktoś chciałby dowiedzieć się więcej na temat organizmów bezszkieletowych z kambru i ich znaczenia dla ewolucji, powinien przeczytać tę

książkę. Większość z tego, o czym niżej przeczytacie, opiera się na zawartych w niej informacjach.

Geolodzy nadają nazwy formacjom skalnym o stałych, lub prawie stałych, właściwościach fizycznych i wyglądzie, dających się prześledzić oraz łatwo nanieść na mapy na znacznym obszarze. Łupki z Burgess są w rzeczywistości tylko małą, nieformalnie nazwaną jednostką w takiej formacji (formacja Stephen) w Górach Skalistych w Kolumbii Brytyjskiej. Warstwa osadowa, w której dokonano oryginalnego odkrycia skamieniałości z Burgess, ma zaledwie 2,5 metra grubości, a uważa się, że ta mała jednostka skalna zawiera kopalne świadectwa większego zróżnicowania planów budowy ciała niż istniejące w dzisiejszych oceanach! Podobnie jak wszystkie łupki, składa się głównie ze sprasowanych i utwardzonych drobnoziarnistych ilów i mułów. Została złożona w morzu przy zachodniej krawędzi kontynentu północnoamerykańskiego mniej więcej w poło-

wie okresu kambryjskiego.

Ponieważ łupki z Burgess odsłaniają się głównie na pozbawionych drzew stokach górskich, można było zrekonstruować w szczegółach pierwotne warunki ich powstawania przez sporządzenie map rozprzestrzenienia i relacji z otaczającymi typami skał. Występujące w nich skamieniałe zwierzęta żyły w stosunkowo płytkich przybrzeżnych wodach na ławicach mułu od strony otwartego oceanu. Owe ławice graniczyły z wapiennymi rafami osiagającymi czasami 200 metrów wysokości, budowanymi przez glony - kambryjskie odpowiedniki raf koralowych, które wówczas jeszcze nie istniały. Lecz takie ich usytuowanie stanowi problem w wypadku skamieniałości z Burgess: gdyby owe pozbawione szkieletu stworzenia po prostu zdechły na ławicach mułu, zostałyby pożarte przez padlinożerców albo uległyby szybko rozkładowi. Co więcej, ich morfologia świadczy o tym, że wiele z owych organizmów musiało pełzać po dnie lub ryc w osadzie, lecz brakuje skamieniałości śladowych, powstałych w wyniku takiej działalności, występujących w tych samych skałach.

Najbardziej zadowalającym rozwikłaniem tej zagadki wydaje się pomysł, że zwierzęta z Burgess (a także rośliny, ponieważ i one pojawiają się wśród skamieniałości) zostały porwane

przez małe sływy (lawiny) mułowe 1 / .myte z dobrze przewietrzonych i oświetlonych ławic oraz bezceremonialnie zrzucone w głębsze wody, gdzie zostały żywcem pogrzebane i zachowały się w środowisku ubogim w tlen. Taki scenariusz tłumaczyłby również, dlaczego skamieniałości są rzadkie w reszcie formacji, której część stanowią łupki z Burgess, oraz czemu, kiedy już występują, pojawiają się zwykle w dużej ilości w pewnych warstwach osadowych.

Zespoły skamieniałości bezszkieletowych organizmów kambryjskich, przypominające występujące w łupkach z Burgess, nie są liczne, lecz znaleziono je już w wielu innych miejscach na całej kuli ziemskiej. Ich rzadkość nie wynika przypuszczalnie z faktu, że owe zwierzęta były nieliczne, lecz raczej z tego, iż niewiele z nich się zachowało.

Zanim w środkowym kambrze osadziły się łupki z Burgess, niektóre organizmy wytworzyły już twarde części. Pojawiają się one jako skamieniałości wraz ze swoimi bezszkieletowymi towarzyszami, a ponieważ stanowią typowy zespół znajdujący w licznych innych odsłonięciach, uznano zwierzęta bezszkieletowe z łupków z Burgess za typowe dla tego okresu. Z dużym prawdopodobieństwem można powiedzieć, że zarówno zwierzęta bezszkieletowe, jak i mające twarde części uczestniczyły w eksplozji kambryjskiej.

Jak to opisał Gould w swojej książce, historia łupków z Burgess skupia się wokół dwóch ludzi: C. D. Walcotta, geologa i bardzo wpływowego w tamtych czasach amerykańskiego na-

ukowca, który odkrył bezszkieletowe skamieniałości w 1909 roku, oraz H. Whittingtona, brytyjskiego paleontologa, który rozpoczął ponowne badania tego odsłonięcia w końcu lat sześćdziesiątych. Walcott był uznanym specjalistą od skamieniałości kambry. W czasie gdy dokonał odkrycia, był również szefem Smithsonian Institution w Waszyngtonie. Letnie prace terenowe w tak pięknych, że aż zapierających dech Górach Skalistych, często z całą rodziną, stanowiły dlań wytchnienie od administracyjnych obowiązków.

Walcott natrafił na skamieniałości z Burgess pod koniec sezonu terenowego w 1909 roku i natychmiast zdał sobie sprawę z ich znaczenia. Jego notatki z terenu świadczą, że skoncentrował się na zbieraniu i opisaniu tak wielu przykładów, jak to było możliwe w krótkim czasie, który pozostał do końca sezonu. Przez następne cztery lata powracał do tego odsłonięcia regularnie, a później odwiedził je w 1917 roku. Łącznie zebrał i przywiózł do Smithsonian Institution około 80 tysięcy okazów!

Wiele ze zwierząt opisanych i naszkicowanych przez Walcotta w jego notatnikach było unikatowych, nigdy przedtem nie znanych. Przedstawiały one niewiarygodne zróżnicowanie form. Walcott jednak był bardzo zapracowany; kiedy wracał do Waszyngtonu po zakończeniu sezonu terenowego, czekały nań obowiązki administracyjne i niezliczone posiedzenia narodowych komitetów i komisji. W rezultacie, jak można było przypuszczać, nie miał zbyt dużo czasu na rozmyślanie o wnioskach wynikających z kolekcji zebranej w łupkach z Burgess. Opublikował opisy skamieniałości, lecz nie dokonał szczegółowego, analitycznego opracowania. Chociaż, jak to wynika także z jego opisów, były to bardzo dziwne formy, umieścił je wszystkie w kontekście dobrze znanych młodszych skamieniałości i współczesnych grup zwierząt. Gould określił jego podejście terminem *shoehorn* (pantofelek), co wydaje się trafne: podobnie jak siostry przyrodnie Kopciuszka, choć bez złych intencji, Walcott próbował wtłoczyć do szklanego pantofelka rzeczy, które się w nim nie mieściły. Co godne uwagi, jego opracowania w zasadzie nie podważono przez ponad pół wieku, aż do czasu Whittingtona i jego współpracowników.

Łupki są skałą rozpadającą się w charakterystyczny sposób na płaskie, płytkowate kawałki. W miejscach takich jak Góry Skaliste strome stoki pokryte fragmentami łupków dostarczają geologom pod koniec dnia wspaniałej rozrywki: biorąc rozbieg, ześlizgują się w dół stoku setkami metrów po minilawinie fragmentów łupków. Liczne płaskie powierzchnie sprzyjają również odnajdowaniu skamieniałości z łupków z Burgess, na których wyglądają one jak spłaszczone, dwuwymiarowe odbicia zwierząt. Tak właśnie widział je Walcott. To dopiero Whittington i jego utalentowani współpracownicy, biorący udział w projekcie Burgess, ujawnili trójwymiarowe aspekty tych stworzeń,

a to pozwoliło im zrozumieć, że nie można ich zaliczyć do żyją-

cych grup, jak to uczynił Walcott.

Whittington pracował nad materiałem z Burgess na Uniwersytecie w Cambridge w Wielkiej Brytanii. Wraz z dwoma magistrantami, Conwayem Morrisem i Derekiem Briggsem, którzy dzisiaj są uznanymi ekspertami, przewrócił do góry nogami powszechnie uznawaną wiedzę na temat ewolucji kambryjskiej. Ci trzej badacze wykazali, że zamiast uporządkowanego postępu, prowadzącego od prymitywnych do bardziej zaawansowanych form, z ciągle wzrastającą liczbą różnych wyspecjalizowanych grup, ewolucja kambryjska wydaje się chaotyczna, stanowi prawdziwą grę przypadków i obfituje w nieudane eksperymenty. Ogromna liczba skamieniałości przez nich opisanych i zbadanych jest pozbawiona znanych następców wśród późniejszych zwierząt.

Choć Whittington i jego koledzy zebrali liczne skamieniałości z łupków z Burgess, to kolekcja Walcotta była znacznie większa i wiele odkryć poczynili, ponownie badając okazy ze Smithsonian Institution. Ich postępy wynikały również z zastosowanego podejścia. Używając takich mikronarzędzi jak wiertła dentystyczne, Whittington i jego współpracownicy pracowicie pocieli (!) skamieniałe zwierzęta, niektóre tylko kilkucentymetrowej długości, przeszledzili w twardej skale ich wyrostki warstwa po warstwie, aby określić liczbę stawów na odnóżu, a czasami wydobywali nawet z wnętrzości większych zwierząt dające się oznaczyć małe organizmy, będące resztkami kambryjskiego posiłku. Te bardzo szczegółowe badania pozwoliły grupie Whittingtona udokumentować unikalność wielu zwierząt z Burgess.

Nikt nie wątpi w zdumiewającą różnorodność stwierdzoną wśród skamieniałości z łupków z Burgess, podobnie jak w to, że powstała ona szybko w skali geologicznej. Istnieją jednak ciągle różnice zdań dotyczące znaczenia tych obserwacji. Jedni widzą w nadmiarze planów budowy ciała jedną z głównych tajemnic paleontologii, ponieważ wiele z owych zwierząt nie ma ani oczywistych przodków, ani następców w zapisie kopalnym. Inni są większymi optymistami i podejrzewają, że ten artefakt

wynika z niekompletności zapisu. Poza tym istnieją przecież przerwy nawet w zapisie kopalnym zwierząt mających szkielety i twarde części ciała; zachowanie się większości bezszkieletowych stworzeń z łupków z Burgess jest wobec tych przerw osiągnięciem. Co więcej, w początkach ewolucji zwierząt wielokomórkowych można było oczekiwać wielkiej różnorodności i szybkiego różnicowania się organizmów w efekcie przystosowywania się do wielu dostępnych nisz ekologicznych i sposobów życia. Należało się również spodziewać szybkich i częstych wymierań wtedy, gdy pewne rozwiązania się nie sprawdzały, a grupy przeżywające mogły się wówczas rozprzestrzeniać, aby wypełnić powstałą próżnię. Być może ciągłość jest większa, niż się wydaje, co stałoby się widoczne, gdyby tylko istniał materiał pozwalający

paleontologom śledzić szybko zmieniające się ścieżki ewolucji. Zauważa się obecnie ogromne zainteresowanie zespołami skamieniałości (podobnymi do skamieniałości z łupków z Burgess), które odkryto w różnych częściach świata. Być może już niebawem nasza wiedza na temat eksplozji kambryjskiej będzie bardziej kompletna.

Zamykam ten rozdział fascynującym pytaniem postawionym przez S. J. Goulda: co by było, gdyby puścić taśmę ewolucji od początku? Niezależnie od różnic w interpretacji kambryjskiego zapisu kopalnego, większość specjalistów zgodziłaby się zapewne, że rezultat - dzisiejszy świat zwierząt - byłby przypuszczalnie zupełnie inny. Proces szybkiego różnicowania się w kambrze (a także w kilku późniejszych momentach), połączony z przypadkowymi, jak się wydaje, wymieraniami, pozostawił grupy niedobitków, które przeżyły raczej przez przypadek, a nie dlatego, że miały jakies szczególne cechy. Oczywiście, czynniki takie, jak możliwość przystosowania się i tolerancja na rozmaite warunki środowiskowe, pomagały, lecz gdyby rozpocząć wszystko od nowa, jest mało prawdopodobne, aby przeżyły te same grupy. Nieunikniony wydaje się więc wniosek, głęboko niepokojący niektórych, że jest duże prawdopodobieństwo, iż *Homo sapiens* nigdy by nie powstał.

## ROZDZIAŁ 8

### RYBY, LASY I GONDWANA: ERA PALEOZOICZNA

Eksplozja kambryjska rozpoczęła erę paleozoiczną, literalnie: „okres dawnego życia”. Trwając około 300 milionów lat, paleozoik był świadkiem rozwoju życia - od prymitywnych, skamieniałych stworzeń z łupków z Burgess aż do ryb, owadów, gadów, a w końcu nawet bezpośrednich poprzedników ssaków. Kontynenty, podobnie jak oceany, stały się środowiskami odpowiednimi dla istot żywych. Pod koniec ery paleozoicznej rozwinęły się w gorącym, łaskawym klimacie

szeroko rozprzestrzenione bujne, bagniste lasy - źródło wielu obecnych pokładów węgla. W czasie znacznej części paleozoiku większość współczesnych kontynentów południowych - Afryka, Ameryka Południowa, Australia, Indie i Antarktyda - była połączona w gigantyczną masę lądową, zwaną Gondwaną. Pod koniec tej ery zderzenia pomiędzy Gondwaną a pozostałymi kontynentami utworzyły jeszcze większą masę lądową, nazwaną przez geologów Pangeą; obejmowała ona praktycznie wszystkie dzisiejsze kontynenty. Pangeą rozciągała się od bieguna do bieguna, a zderzenia, dzięki którym powstała, wypiętrzyły wielkie łańcuchy górskie w regionach, które dziś stanowią wschodnią część Ameryki Północnej, Szkocję, Azję oraz wschodnią Australię, jak również w wielu innych miejscach globu. Zakończenie tej ery zaznaczyło się przypuszczalnie największym masowym wymię-

ranem w ciągu całej historii Ziemi. Dotknęło to niemal wszystkie istoty żywe, zarówno rośliny, jak i zwierzęta, żyjące na lądach i w oceanach. Gatunki i całe rodziny po prostu zniknęły z zapisu kopalnego. W rodzinach, które przeżyły, często pozostała tylko niewielka liczba gatunków. Przyczyna tej globalnej katastrofy pozostaje ciągle nieznana.

Skąły paleozoiczne są liczne na kontynentach. W porównaniu z wcześniejszym okresem istnieje nadzwyczaj kompletny zapis zdarzeń z tego etapu historii Ziemi. Wynika to częściowo z faktu, że na ogół poziom morza w paleozoiku był bardzo wysoki. Wnętrza kontynentów były często zalewane przez płytkie morza, w których warstwa po warstwie odkładały się osady. Grzebały one rośliny i zwierzęta, zachowując w ten sposób świadectwa klimatu i środowiska z czasów ich osadzenia. Ameryka Północna, na przykład, znajdowała się w czasie paleozoiku, z pewnymi przerwami, niemal w całości pod wodą. Te okresy pokrycia morzem znajdują odbicie w paleozoicznych osadach, ciągle okrywających znaczną część kontynentu. Zachowały się, ponieważ jądro Ameryki Północnej - podłoże, na którym się odkładały - to stara stabilna tarcza skał archaicznych i proterozoicznych, położona nisko i geologicznie spokojna. Takie regiony ulegają stosunkowo słabej erozji.

Dobre zachowanie się skał paleozoicznych i młodszych oraz niezliczone ślady życia, klimatu i tektoniki w nich zawarte czy-



nią zwięzły opis ostatnich, około 500 milionów lat ziemskiej historii dość trudnym zadaniem. Istnieje tak wiele szczegółów, że grozi nam niebezpieczeństwo niedostrzeżenia kształtu lasu wśród poszczególnych drzew. Dlatego w tym i następnych rozdziałach przedstawiono ogólny zarys najważniejszych zdarzeń i tylko niektóre z nich są omówione bardziej szczegółowo. Być może Czytelnik zauważył, że na rycinie 1.1 każda z trzech er geologicznych ostatnich 500 milionów lat - paleozoik, mezo-zoik i kenozoik - jest krótsza od poprzedniej. Podobnie jak w przypadku historii człowieka, w miarę zbliżania się do czasów dzisiejszych mamy coraz więcej informacji, pozwalającej na uszczegółowienie i dokładniejszy podział historii geologicznej. Zainteressowani głębszym poznaniem zapisu kopalnego

moga skorzystać z krótkiej bibliografii, umieszczonej na końcu tej książki. W wymienionych tam pozycjach Czytelnik powinien *znaleźć* odpowiedzi na większość nurtujących go pytań.

## **Trylobity i przyczyny wymierań**

Na początku paleozoiku kontynenty ciągle były prawie pozbawione życia. Poza glonami, które w tym czasie skolonizowały już lądy i przypuszczalnie nadawały wilgotniejszym regionom zielonkawą zabarwienie, kontynenty musiały być równie jałowe, jak powierzchnia Księżyca. Pod koniec ery rozrosły się lasy, owady wypełniły przestworza, a po ziemi biegały gady. Ryby zasiedliły jeziora rozrzucone po Pangei. Rozwój tych form życia jest dość dobrze znany; to fascynująca historia. Czasami postępuje ona wolno i monotonicznie, a kiedy indziej jest przerywana bardzo szybkimi zmianami.

W poprzednim rozdziale opisałem pokrótce eksplozję kam-bryjską. Jej rezultatem była flora i fauna oceanów, nie mająca poprzedników w ziemskiej historii. Lecz to dopiero początek. Bardzo szybko, w porównaniu z ogromnymi odcinkami czasu, który właśnie minął, powstały nowe formy życia. Lecz równocześnie starsze zanikały, a czasami dość nagle wymierały. Nie znamy dokładnie przyczyn tych szybkich zmian, ale większość z nich zaszła przypuszczalnie w reakcji na jakies czynniki zewnętrzne. Jeśli świat byłby zupełnie stabilny, a klimat niezmienny, z jednorodnym środowiskiem, stałą gęstością populacji i bez dryfu kontynentów, przypuszczalnie wiele z tych zmian nigdy by nie nastąpiło. A przynajmniej zachodziłyby znacznie wolniej.

Trylobity, charakterystyczne skamieniałości kambru, dostarczają pouczającej ilustracji na temat wymierania gatunków i możliwych ich przyczyn. Historia trylobitów jest szczególnie dobrze udokumentowana w Ameryce Północnej, którą przez większość kambru znajdowała się w pobliżu równika i

była okresowo zalewana przez ciepłe, płytkie morza. Zidentyfikowano wiele gatunków trylobitów kambryjskich, a na pod-

stawie typu osadów, w których uległy fosylizacji, możliwe stało się odtworzenie sposobu ich życia. Występowały wśród nich stworzenia zarówno pływające, jak i zamieszkujące dno, odmiany zasiedlające ciepłe, płytkie wody i takie, które żyły głębiej w chłodnych regionach. Większość gatunków trylobitów występuje w zapisie kopalnym w ciągu tylko kilku milionów lat lub krócej, choć w dowolnym momencie istniało ich wiele. Regularne znikanie gatunków po kilku milionach lat i pojawianie się nowych jest częścią szumu tła ewolucji. Jednakże pod koniec okresu kambryjskiego w trzech różnych momentach duża liczba gatunków gwałtownie wyginęła, najwyraźniej w czasie kilku tysięcy lat lub nawet krótszym. Jedno z tych „masowych wymierań” trylobitów wyznaczyło koniec okresu kambryjskiego. Po każdym z wymierań następował okres opisywany przez paleontologów jako radiacja adaptatywna, co oznacza szybkie powstawanie wielu nowych gatunków z jednej grupy przodków.

Co powodowało te nagłe *zdarzenia*? W całej historii życia na Ziemi zdarzały się wymierania, z których wiele obejmowało tylko nieliczne gatunki, podczas gdy inne miały najwyraźniej charakter globalny i katastroficzny. Geolodzy i paleontolodzy starają się odkryć przyczyny tych wymierań w zapisie skalnym. W większości wypadków nie znaleźli oni jednoznacznych odpowiedzi, lecz w badaniach ciągle przewijają się pewne wątki. Należą do nich zmiany klimatyczne, przemieszczanie się kontynentów, ewolucja drapieżników i zmiany poziomu morza. W wypadku trylobitów wiele wskazuje na zmiany klimatyczne. Wymierania, jak się wydaje, najbardziej dotknęły gatunki żyjące w najcieplejszych wodach. Co więcej, przodkami większości gatunków szybko ewoluujących (radiacja) po każdym wymieraniu były trylobity żyjące w chłodniejszych, głębszych wodach wzdłuż krawędzi kontynentów. Doprowadziło to wielu geologów do wniosku, że owe wymierania następowały w wyniku nagłego ochłodzenia. Gatunki zimnolubne potrafiły przetrwać zmianę, przystosowane zaś do ciepłych wód - wymarły. Choć hipoteza ta nie została udowodniona, wydaje się dość racjonalna w świetle dostępnych danych.

Trylobity nie były wyjątkiem; wiele miejsc w zapisie skalnym wskazuje na to, że zmiany klimatyczne wywarły ogromny wpływ na przebieg ewolucji. Nie wszystkie jednak przeobrażenia flory i fauny w czasie paleozoiku wynikały ze zmienności klimatu, a przynajmniej nie bezpośrednio. Stromatolity, owe struktury budowane warstwa po warstwie przez „maty glonowe”, tak bardzo rozprzestrzenione w proterozoiku, stały się znacznie mniej powszechne w paleozoiku. Lecz w ich wypadku nic nie przemawia za tym, że spadek ich znaczenia był w jakikolwiek sposób związany ze zmianą klimatu. Przypisywany bywa na ogół pojawieniu się zwierząt żywiących się glonami, a także ryjących w mule, które

niszczyły maty glonowe wkrótce po ich powstaniu. Żyjące dzisiaj Stromatolity powstają tylko w marginalnych środowiskach, gdzie zagrażające im stworzenia są rzadkie lub nieobecne.

Wiele z wymierań było prawdopodobnie związanych ze zmianami poziomu morza, choć bardzo mało dowodów poświadcza to w wypadku trylobitów czy stromatolitów. Jednakże nawet stosunkowo małe wahania poziomu oceanów mogą radykalnie zmienić charakter środowisk wzdłuż wybrzeży i w płytkich morzach śródładowych. Dlatego prowadzą one do wielkich zaburzeń wśród organizmów żyjących w takich środowiskach. Lecz w jaki sposób możemy dowiedzieć się o zmianach poziomu morza sprzed setek milionów lat? Nikt wtedy nie dokonywał pomiarów, lecz ponownie skały udzielają nam pewnych wskazówek. Opowiadają one interesującą historię i w następnym podrozdziale poczynimy małą dygresję, ilustrującą wnioskowanie, dzięki któremu odkryto szczegóły podnoszenia się i opadania poziomu oceanów.

## Zmiany poziomu morza

Jak wynika z zapisu skalnego, przez większą część paleozoiku poziom morza pozostawał dość wysoki w stosunku do kontynentów. Podlegał on jednak również dużym fluktuacjom. Choć z przerwami, kontynenty były w większości zalane morzami. Zmiany poziomu morza zostały szczególnie dobrze udokumentowane w skałach zachodniej części Ameryki Północnej. Klucz

do ich zrozumienia jest dość prosty: większość skał osadowych złożona została pierwotnie w wodzie, a osady gromadzą się we wszystkich zbiornikach wodnych na dnie. Opady deszczu i erozja powodują niszczenie skał na kontynentach, a okruchy będące wynikiem tego procesu są znoszone rzekami do jezior i oceanów; opadając, tworzą warstwy osadów. Co więcej, grubszy materiał osadza się blisko wybrzeża, podczas gdy drobniejsze ziarna pozostają w zawieszynie i są wynoszone dalej w morze. Tak więc typ osadu zależy od głębokości wody. Nawet to zupełnie oczywiste rozumowanie pozwala wiele się dowiedzieć o zmianach poziomu morza, występujących w paleozoiku.

Skały osadowe w zachodniej części Ameryki Północnej przynoszą szczególnie wiele informacji, ponieważ w początkach kambriu i w czasie odkładania się łupków z Burgess region zajmowany dziś przez Góry Skaliste stanowił krawędź kontynentu. Rekonstrukcje ziemskiej geografii świadczą o tym, że kontynent w kambrze był skrecony w porównaniu z dzisiejszym położeniem, a to, co stanowi obecnie zachodnią część Ameryki Północnej, wówczas leżało wzdłuż jej północnej krawędzi w pobliżu równika (ryc. 7.1). Nie ma to jednak wielkiego znaczenia dla naszej historii. Ważne jest, że zachodnia część kontynentu była w zasadzie dość stabilna - nie zdarzały się tam kolizje z innymi kontynentami, nie rozprzestrzenił się wulkanizm związany z

subdukcją płyty oceanicznej. Osady odkładane były wzdłuż tej spokojnej krawędzi kontynentalnej przez większość paleozoiku. Jeśli kiedykolwiek odwiedzaliście Wielki Kanion, mogliście obserwować rezultaty tego procesu: płasko leżące skały osadowe, budujące większość ścian kanionu, odpowiadają wiekowo okresowi od kambriu do permu, a więc odcinkowi czasu obejmującemu całą erę paleozoiczną. Jeśli przyjrzymy się bliżej, zauważymy, że występują tam bardzo różne rodzaje skał, będące odbiciem środowiska, w którym odkładały się osady. W rzeczywistości piękno Wielkiego Kanionu wynika częściowo z tej różnorodności, ponieważ każda skała w inny sposób ulega erozji, pewne ich typy tworzą półki i urwiste klify, a inne wietrzeją, formując łagodniejsze stoki. Dla przypadkowego obserwatora nie jest już tak oczywiste, że istnieją duże przerwy w sekwencji osa-

dów ścian kanionu, odpowiadające znacznym odcinkom czasu paleozoiku, które nie są reprezentowane przez skały. Owe brakujące fragmenty i zmienność typów skał są, przynajmniej częściowo, rezultatem wahań poziomu morza.

Wydaje się oczywiste, że piasek jest pospolitym osadem na krawędzi kontynentów. Nie trzeba zbyt długo szukać wzdłuż większości wybrzeży morskich, aby znaleźć choćby małą, piaszczystą plażę. Wybrzeża są miejscami bardzo aktywnymi. Fale oceanu dostarczają ogromnych ilości energii, transportując i wynosząc materiał dostarczony przez rzeki, a bardzo drobne osady, takie jak il, który jest głównym minerałem występującym w łupkach, po prostu tam się nie odkładają. W pobliżu wybrzeża gromadzi się stosunkowo gruboziarnisty piasek, podczas gdy drobne cząstki pozostają w zawieszynie i wynoszone są do spokojniejszych, głębszych wód, gdzie powoli opadają na dno, tworząc muł. Ten, twardniejąc przez długi okres, staje się w końcu łupkiem. Jeszcze dalej od wybrzeża, gdzie nie dociera drobnoziarnisty materiał, który opadł już w kolumnie wody, większość gromadzącego się osadu najprawdopodobniej stanowią szczątki organizmów morskich, żyjących w pobliżu powierzchni morza i budujących swoje szkielety i muszle z węglanu wapnia. Takie osady stają się z czasem wapieniami. Jeśli więc prześledzimy typy osadów, począwszy od wybrzeża aż do głębszych wód, wzdłuż wielu wybrzeży stwierdzimy sekwencję składającą się z piasków i piaskowców w pobliżu wybrzeża, mułu i łupków nieco dalej, a w końcu osadów zbudowanych głównie z węglanu wapnia.\* Wyobraźmy sobie *teraz*, co się stanie, gdy poziom morza się podniesie. Cała sekwencja przesunie się w kierunku wnętrza kontynentu. Piaszczyste osady poprzedniego wybrzeża nie będą już występowały przy samej krawędzi morza, lecz w obszarze głębszych wód. Powyżej owych warstw piaszczystych osadzą się łupki. Dalsze podnoszenie się poziomu morza spowoduje powstanie jeszcze bardziej głębokowodnego środowiska w miejscu

dawnego wybrzeża i ponad łupkami ułożą się osady bogate w węglan wapnia. Tak więc sekwencją od wybrzeża do głębokiej wody, składająca się z piaskowców, łupków i wapieni, stanie się w miarę upływu czasu sekwencją pionową tych samych typów skał w miejscu dawnej linii brzegowej. Dokładnie coś takiego właśnie obserwujemy w Wielkim Kanionie. Lecz czy naprawdę możemy posługiwać się zasadą uniformitaryzmu i interpretować pionową sekwencję osadów z Wielkiego Kanionu jako rezultat stopniowej zmiany głębokości morza wzdłuż krawędzi paleo-zoicznego kontynentu? Zdecydowanie tak, ponieważ w całej zachodniej części Ameryki Północnej można obserwować takie same sekwencje poziome i pionowe. Mapy geologiczne, przedstawiające jeden plan czasowy, pokazują podobne następstwo typu osadów, jakie obserwujemy dzisiaj wzdłuż wybrzeży, na przykład wybrzeża Zatoki Meksykańskiej w Stanach Zjednoczonych: piaskowiec, łupek i wapień od wschodu na zachód. Mapy przedstawiające wcześniejszy lub późniejszy moment czasu pokazują tę samą sekwencję przesuniętą geograficznie, co ilustruje fakt, że w miarę jak poziom morza podnosił się i opadał, linia wybrzeża migrowała na wschód lub zachód. Schemat tego zjawiska prezentuje rycina 8.1.

Jeśli nawet uznamy te obserwacje za zapis podnoszenia się i opadania poziomu morza, pozostaje ciągle kwestia, co zmieniło się w rzeczywistości: czy to kontynenty się wypiętrzały, czy może podnosił się bezwzględny poziom morza? Poza tym osady to tylko zapis zmian względnych, a wiemy już, że kontynenty podlegały ruchom pionowym - wysoko w Alpach i Górach Skalistych skały zawierają skamieniałości powstałe w oceanie, choć przecież oceany nie były nigdy tak głębokie. Stwierdzenie, że następowały rzeczywiste zmiany poziomu morza, byłoby bardziej przekonujące, gdyby w skałach tego samego wieku w bardzo różnych rejonach geograficznych znaleziono podobne dowody, jak te z zachodniej części Ameryki Północnej. Geolodzy z dość dużą dokładnością wykonali mapy występowania różnych typów osadów na całej prawie Ziemi i w wyniku syntezy takich danych rozumiemy dzisiaj dość dobrze zakres i czas globalnych zmian poziomu morza w ciągu całego fanerozoiku. Sumarycznie informacja ta dla ery paleozoicznej pokazana została, wraz ze skalą czasową paleozoiku, na stronie 128. Z wykresu tego wynika, że poziom morza był wysoki przez większość tej ery.

Skoro zapis skalny dowodzi dużych zmian poziomu morza, narzuca się pytanie: co je spowodowało? O ile wiemy, istnieją tylko dwie możliwości: albo zachodziły zmiany objętości wody w oceanach, albo, zmieniając objętość, wodę wypychały inne elementy, na przykład kontynenty, wyspy lub grzbiety oceaniczne. Wiemy, że okresy zlodowaceń charakteryzują się obniżeniem poziomu

morza, ponieważ ogromne ilości wody z powierzchni Ziemi zostają uwięzione w lodolodach na kontynentach. Ocenia się, że w szczycie ostatniego zlodowacenia, w przybliżeniu 20 tysięcy lat temu, powierzchnia morza znajdowała się dobre 100 metrów niżej niż dzisiaj. I choć większość tego lodu zniknęła, ciągle znaczne ilości wody pozostają zamrożone w czapach lodowych. Jeśli uległyby one całkowitemu stopieniu, to poziom morza podniósłby się jeszcze o około 65 metrów. Może się wydawać, że to niewiele, lecz znaczna część ludzkiej populacji żyje blisko poziomu morza. Ocalałoby miasto Meksyk, lecz większość Los Angeles, Nowego Jorku i Berlina (a to tylko kilka przykładów) zostałaby zalana.

Choć epizody zlodowaceń wywierają ogromny wpływ na poziom morza, większość fluktuacji obserwowanych w skałach paleozoicznych nie zaszła w czasie, w którym, jak niezależnie dowiedziono, istniały globalne zlodowacenia. Najprawdopodobniej fluktuacje te były spowodowane zmianami objętości grzbietów oceanicznych. Jak to opisano w rozdziale 5, wzdłuż grzbietów oceanicznych wylewa się gorąca magma, tworząc nowe dno morskie. Ponieważ nową skorupą oceaniczną jest gorąca i unosi się ku górze, owe grzbiety stają się regionami charakteryzującymi się wyniesioną topografią. Leżą one na głębokości o połowę mniejszej niż starsze, chłodniejsze części dna morskiego. Kiedy średnie tempo spredu dna morskiego wzrasta - albo z powodu tworzenia się nowego segmentu grzbietu, albo dlatego, że stary grzbiet rozszerza się szybciej - powiększa się również objętość całego systemu grzbietu. To trochę tak, jakbyśmy włożyli cegłę do wiadra pełnego wody - poziom wody odpowiednio się podniesie. Wysoki poziom morza w paleozoiku wynikał przypuszczalnie z tego, że system grzbietów miał znacznie większą objętość niż dziś.

## **Wielkie zderzenie: powstanie Appalachów**

Osady złożone w zachodniej części Ameryki Północnej, wiernie i w sposób mniej lub bardziej ciągły odzwierciedlając podnoszenie się i opadanie poziomu morza, gromadziły się wzdłuż tak zwanej krawędzi pasywnej; jest to krawędź kontynentu znajdująca się całkowicie w obrębie dużej płyty, z dala od zderzających się kontynentów, subdukcji i wulkanizmu. Taki charakter ma dziś wschodnie wybrzeże Ameryki Północnej. Istnieją dowody, że w końcu ery paleozoicznej na zachodzie kontynentu następowały zderzenia z małymi fragmentami skorupy wulkanicznej, które przypuszczalnie przypominały materiał charakteryzujący dziś luki wysp zachodniego Pacyfiku, brakuje jednak świadectw dużego zderzenia typu kontynent-kontynent. Sytuacja po przeciwnej stronie kontynentu była zupełnie inna. We wschodniej części Ameryki Północnej istnieją liczne

dowody wulkanizmu, kolizji i tworzenia się gór w czasie całego paleozoiku. Stanowiło to część procesu, który spowodował połączenie wszystkich głównych istniejących wówczas kontynentów w jeden superkontynent, zwany Pangea.

Zapisek tych procesów jest górski łańcuch Appalachów. Ta prowincja geologiczna rozciąga się od Nowej Fundlandii na północy do Alabamy na południu i jest to tylko jej część odsłonięta na powierzchni (ryc. 4.3). Znaczną część pierwotnego grzbietu pozostaje dziś niedostępna bezpośredniej obserwacji. Jak należało oczekiwać, w wypadku tak wielkoskalowego zjawiska, Appalachy są dość zróżnicowane wzdłuż swojej rozciągłości, co jest rezultatem różnorodności szczegółów historii geologicznej poszczególnych ich części. W ogólnym jednak spojrzeniu Appalachy są zapisek zamykania się dawnego basenu oceanicznego i łączenia razem dużych fragmentów kontynentalnych - Ameryki Północnej, Europy i Afryki - w jedną masę lądową. Choć zdarzenia te miały miejsce setki milionów lat temu, bliższe porównanie skał zachowanych w Appalachach ze skałami znacznie młodszych łańcuchów górskich, takich jak Alpy, które również powstały w wyniku zderzenia kontynentów, wykazuje wiele podobieństw.

Dzisiaj Appalachy nie są wielkim łańcuchem górskim z poszarpanymi, pokrytymi śniegiem szczytami, lecz przeważnie przedstawiają serię malowniczych, łagodnych wzgórz i dolin. Częścią tej geologicznej prowincji są piękne góry Blue Ridge w Wirginii, Great Smoky Mountains w Karolinie Północnej i Green Mountains w Vermont. Dzisiejsza topografia Appalachów w rzeczywi-

stości ma niewiele wspólnego z pierwotnymi górami, które zostały zniszczone przez erozję już w połowie ery mezozoicznej. W południowej części prowincji zerodowany łańcuch jest dziś przykryty, co najmniej na połowie długości, płasko leżącymi osadami niziny nadbrzeżnej. Obecne góry powstały w niezbyt odległej geologicznie przeszłości, w wyniku dość łagodnego wypiętrzenia dawnych, pofałdowanych skał, po czym w rezultacie zróżnicowanej erozji różnych typów skał uformowała się typowa dla większości łańcucha struktura dolin i grzbietów.

Choć Appalachy są złożone pod względem geologicznym, geolodzy amerykańscy i kanadyjscy badają je w najdrobniejszych szczegółach od ponad stu lat, dzięki czemu ich budowa jest dobrze znana. Jednakże hipotezy dotyczące ich powstania i ewolucji, stworzone w latach sześćdziesiątych, przed pojawieniem się teorii tektoniki płyt, nie są przekonujące. Owym wcześniejszym scenariuszom zabrakło szczególnie mechanizmów wyjaśniających wulkanizm, pocięcie uskoki i silny metamorfizm, zapisane w zachowanych skałach Appalachów. Kiedy zdano sobie sprawę, że kontynenty i oceany nie trwają na Ziemi niezmiennie, zaczęto przedstawiać bardziej wiarygodne hipotezy. W najbardziej uproszczonym zarysie powszechnie obecnie akceptowany pogląd, dotyczący powstania Appala-

chów, wygląda w przybliżeniu tak jak opisano poniżej. Musimy jednak pamiętać, że w rzeczywistości historia ta jest znacznie bardziej złożona i że następstwo *zdarzeń* przebiegało odmiennie w różnych miejscach ogromnie długiego łańcucha tworzących się Appalachów.

W kambrze i potem w ordowiku, w miarę jak podnosił się poziom morza, wybrzeże we wschodniej części Ameryki Północnej przesuwało się stopniowo na zachód. Grube sekwencje osadów, szczególnie skał węglanowych, takich jak wapienie, odkładane były wzdłuż krawędzi kontynentu. W tym okresie wschodnie wybrzeże, podobnie jak zachodnie, stanowiło spokojną krawędź pasywną. Lecz mniej więcej w połowie ordowiku, w efekcie sub-dukcji dna morskiego, ocean na wschodzie zaczął się zamykać (ryc. 8.2). Po niedługim czasie nastąpił pierwszy z trzech głównych zidentyfikowanych w historii Appalachów epizodów two-

*rzenia* się gór, kiedy subdukcji uległ ostatni znajdujący się tam fragment dna morskiego. Kontynent północnoamerykański *zderzył* się z różnorodnymi fragmentami skorupy, zgniatając ogromną platformę osadów węglanowych, które osadziły się wzdłuż tej krawędzi i wypchnęły jej część daleko na zachód, w kierunku wnętrza kontynentu. Na wschodzie na „taśmociąg” tektoniki płyt znajdowało się więcej oceanu nadal się zamykającego, w miarę jak skorupa ulegała subdukcji. W końcu, przypuszczalnie 380-390 milionów lat temu, w wyniku tego procesu ocean został kompletnie pochłonięty, a to, co jest obecnie Skandynawią, wraz z częścią Wielkiej Brytanii zderzyło się z Ameryką Północną. Ten drugi epizod tworzenia się Appalachów został stwierdzony zarówno w Europie, jak i w Ameryce: rodzaje skał, skamieniałości oraz typy struktur geologicznych pochodzących z tego okresu są bardzo podobne po obu stronach Atlantyku. Około 70-80 milionów lat później jeszcze inny duży kontynent - stanowiła go wówczas północno-zachodnia część Afryki (a przypuszczalnie również Ameryka Południowa) - zderzył się z południową częścią Ameryki Północnej, rozpoczynając ostatni z trzech głównych okresów tworzenia się Appalachów. To zderzenie było najprawdopodobniej odpowiedzialne również za powstanie gór Ouachita w Oklahomie i Arkansas, będących w zasadzie kontynuacją Appalachów wzdłuż południowej krawędzi Ameryki Północnej. W sposób niezwykle uproszczony rycina 8.2 ukazuje w serii ujęć, w jaki sposób owe kolizje mogły następować. Proszę zwrócić uwagę, że szkic ten odnosi się właściwie do zdarzeń w południowych Appalachach i drugi etap ich powstawania tłumaczy zderzeniem z łukiem wysp (A), a nie z północną Europą.

Ostatni etap tworzenia się Appalachów połączył razem gigantyczny południowy kontynent, znany jako Gondwana, którego częścią była Afryka, z północną masą lądową, złożoną z Ameryki i Europy. Był to ostatni krok w tworzeniu się rozcią-



gającego się od bieguna do bieguna megakontynentu, zwanego Pangeą (ryc. 8.4). Znacznie później ów olbrzymi kontynent, jak to zobaczymy, ponownie się rozpadł, tworząc dzisiejszy Ocean Atlantycki.

Procesy, które stworzyły Appalachy, są typowe również dla młodszych pasm górskich, takich jak Alpy. I choć szczegóły pozostają niejasne, to najprawdopodobniej wiele znacznie starszych prowincji geologicznych, omawianych w rozdziale 4, takich jak Grenville, jest rezultatem bardzo podobnych procesów. Grenville i Appalachy są równoległymi, przylegającymi do siebie strefami (ryc. 4.3), z których każda powstała w wyniku kolizji wzdłuż wschodniej krawędzi Ameryki Północnej i w wypadku każdej do krawędzi kontynentu dodana została nowa skorupa. Struktura wiekowa kontynentu północnoamerykańskiego, charakteryzującego się koncentrycznymi w przybliżeniu pasmami coraz młodszej skorupy otaczającej stare jądro kontynentalne, skłoniła wielu geologów do przyjęcia poglądu, że kontynent powstaje w procesie stopniowego przyrastania wzdłuż krawędzi.

Appalacchy nie są jedynymi górami utworzonymi w paleo-zoiku. Ural w centralnej Rosji to także rezultat zderzenia dwóch kontynentów przy końcu tej ery i jeszcze jeden etap prowadzący do powstania gigantycznej masy lądowej Pangei. Można łatwo stwierdzić, że dziś Ural nie jest równoległy do krawędzi kontynentu, jak Appalachy; powstały wówczas szew nie pękł i kontynent nie uległ jeszcze ponownemu rozpadowi. Również znaczna część wschodniej Australii została w paleo-zoiku dodana do tego kontynentu w wyniku serii zdarzeń górotwórczych, które dotknęły także Antarktydę. W tym wypadku proces nie miał charakteru zderzenia dwóch dużych kontynentów, lecz stanowił raczej akrecję łuków wysp wraz z przyległymi osadami, podobnie jak w czasie pierwszego z trzech epizodów górotwórczych w Appalacchach.

## **Życie w paleozoiku**

W miarę jak procesy tektoniki płyt rozmieszczały i ponownie przesuwały kontynenty na powierzchni Ziemi w paleozoiku, tworząc w końcu Pangeę, postępowała ewolucja form żywych. Prawie na pewno przebiegała pod silnym wpływem zmieniającego się rozmieszczenia lądów i mórz. Powtarzające się wymię-

rania i radiacje trylobitów mają odpowiedniki w zapisie kopalnym wielu innych grup w paleozoiku.

Kręgowce - zwierzęta mające, podobnie jak my, kręgosłup - nie występują wśród skamieniałości z łupków z Burgess lub ich

odpowiedników w innych częściach świata. Powstały one jednak dość wcześnie. Ich pierwszymi przedstawicielami w zapisie geologicznym są ryby. Fragmentarycznie zachowane skamieniałości uważane za części ryb znaleziono w osadach z końca okresu kambryjskiego oraz z ordowiku. Owe wczesne ryby były najwyraźniej silnie opancerzonymi stworzeniami; wiele skamieniałości to kawałki zewnętrznych płytek kostnych. Wydaje się, że ryby zamieszkiwały dno, odżywiały się, filtrując wodę, i nie były drapieżnikami, jak ma to miejsce w wypadku dzisiejszych ryb, ponieważ nie miały szczęk, które umożliwiałyby gryzienie. Nieliczni potomkowie tych bezszczękowych ryb przeżyli do dzisiaj, a ich przykładem jest minóg.

Choć skamieniałości najwcześniejszych ryb występują w osadach oceanicznych, większość zapisu, poczynając od syluru sprzed około 440 milionów lat, pochodzi raczej z osadów słodkowodnych niż morskich. Geolodzy spierają się, czy kręgowce rzeczywiście powstały w wodach słodkich, czy w oceanach. Niestety, osady jeziorne i rzeczne są jeszcze mniej kompletne od morskich i brak przekonujących dowodów, aby rozwiązać ten problem. Pod koniec okresu sylurskiego, co ciągle oznaczają ponad 400 milionów lat temu, nowa grupa ryb pojawiła się zarówno w wodach słodkich, jak i w oceanach. Miały one łuski i liczne ostre, kolczaste płetwy, a także szczęki; zapewne były bardzo sprawnymi drapieżnikami. W dewonie owe ryby szczękowe rozkwitły i różnicowały się tak, że stanowiły główne ogniwo złożonego łańcucha pokarmowego, w którym mniejsze gatunki były zjadane przez większe, a te z kolei - przez jeszcze większych współbraci. Jedną z przedziwnych dewońskich ryb, silnie opancerzona dużymi, kostnymi płytami, chroniącymi głowę i przednią część ciała, osiągała około 10 metrów długości - był to naprawdę przerażający mieszkaniec głębin.

Powstanie szczęk stanowiło ważny etap w ewolucji ryb, a nawet wszystkich kręgowców. To również interesujący przy-

kład często spotykanego w ewolucji zjawiska, polegającego na zmianie wcześniej istniejącej części ciała lub struktury tak, aby mogła wykonywać nowe zadania. Większość paleontologów uważa, że szczęki powstały z chrząstek, podparcia skrzelowych, istniejących w głowach ryb bezszczękowych. Znajdowały się one w odpowiednim anatomicznie miejscu i przy minimalnej zmianie mogły funkcjonować jako proste szczęki, tak jak to pokazano na rycinie 8.3. Najwcześniejsze zęby były najprawdopodobniej zmodyfikowanymi łuskami. Historia ewolucji jest pełna takich naprawdę fascynujących szczegółów i znowu kłania się nam tutaj S. J. Gould: gdyby puścić taśmę od począt-

ku, czy historia by się powtórzyła? Czy szczęki powstałyby

w ten sam sposób? Czy w paleozoiku istniałyby ryby, jakie znamy dzisiaj?

Jedną z odmian ryb powstałych w dewonie stanowiła grupa wyjściową kęgowców lądowych, obejmująca ryby płucodyszne, których kilka gatunków przetrwało do dziś w suchych środowiskach Australii, Afryki i Ameryki Południowej. Ryby płucodyszne potrafią pobierać tlen bezpośrednio z wody za pomocą skrzel, jak inne ryby, oraz połykając powietrze, dostające się do zaczątkowych płuc, w czasie gdy zamieszkiwane przez nie zbiorniki wodne stagnują lub wysychają. Przodkowie kęgowców lądowych wyposażeni byli w podobne zdolności. Jak na ironię, stworzenia zasiedlające ląd zawdzięczają swe istnienie przystosowaniu ryb, które pozwalało im przetrwać okresy suszy, aby mogły potem kontynuować życie w wodzie!

Pierwszym etapem rozwoju kęgowców, które żyły wyłącznie na lądzie, była ewolucja płazów. Współczesne płazy, takie jak żaby i ropuchy, rozpoczynają swoje istnienie w wodzie, lecz kiedy dojrzewają, wypełzają na ląd i spędzają tam zwykle swe dorosłe życie. Przypuszczają się, że cykle życiowe wczesnych płazów były podobne. Pojawiają się one po raz pierwszy w zapisie kopalnym w okresie dewońskim, a struktura ciała pewnych wczesnych, skamieniałych płazów jest w szczegółach tak podobna do struktury ówczesnych ryb, że nie pozostawia wątpliwości co do ich bliskiego pokrewieństwa. Wydają się one bezpośrednimi potomkami grupy ryb, obejmującej ryby płucodyszne.

Przeście od ryb do żyjących głównie na lądzie płazów zabrało przynajmniej 15 milionów lat, a może nawet więcej. W miarę jak paleontolodzy gromadzili coraz więcej informacji o tym etapie ewolucji, idea, że jedną linią ewolucyjną ryb przystosowała się do płytkowodnych środowisk, a następnie wypełzła na ląd, ustępowała znacznie bardziej złożonemu scenariuszowi. Podobnie jak w czasie eksplozji kambryjskiej i w wielu innych węzłowych punktach ewolucji życia, powstały liczne, jednoczesne i równoległe, gałęzie ewolucyjne, z których rozwinęły się płazy. Mimo podobieństw struktury ciała i innych wspólnych cech, tylko nieliczne z nich przetrwały.

Płazy, którym udało się przetrwać, miały do dyspozycji ląd i szybko się różnicowały. Oczywiście, pewne problemy trzeba było pokonać: dla ich przodków, stale zanurzonych w wodzie, ląd był zupełnie obcym środowiskiem. Musiały one zapobiec wysychaniu i znaleźć nowy sposób poruszania. Co więcej, ich system szkieletowy musiał stać się znacznie silniejszy, aby podtrzymywać całkowity ciężar ciała w powietrzu, znacznie rzadszym ośrodku niż woda, a tym samym o mniejszej wyporności. I w końcu musiały one mieć system płucny, pozwalający spędzać większość życia poza wodą. Niemniej płazy rozwijały się z sukcesem, a niektóre z nich osiągnęły dość znaczne rozmiary. Odżywiały się zarówno mięsą, jak i roślinnością. Z

końcem ery paleozoicznej straciły one na znaczeniu na rzecz gadów, przygotowując scenę dla powstania dinozaurów. Kluczowym wydarzeniem ewolucyjnym, faworyzującym gady było powstanie jaja, podobnego do jaj dzisiejszych gadów i ptaków, mającego twardą zewnętrzną okrywę i zapas pożywienia wewnątrz - takie jaja nie musiały być składane w wodzie. Jajo gadów było rodzajem przenośnego stawu, przyjaźnie omywającego wzrastający embriion w krytycznych, wczesnych stadiach rozwoju. Pozwoliło to gadzimi rodzicom na znacznie swobodniejszy tryb życia.

Pierwsze gady pojawiają się w zapisie kopalnym około 330 milionów lat temu w okresie karbońskim. Długo przed tym, a nawet zanim powstały płazy, ląd był już opanowany przez rośliny. Podobnie jak zwierzęta, rośliny szybko się mnożyły i rozprzestrzeniały, wypełniając nowe środowiska. Okres karboński zawdzięcza nazwę licznym osadom węgla, które są zmienionymi szczątkami wielkich ilości materiału roślinnego z dawnych lasów tropikalnych.

Najwcześniejsze skamieniałości roślin pojawiają się w okresie sylurskim. Podobnie jak płazy i gady, rośliny napotkały na duże problemy w kolonizacji lądu i były to problemy bardzo podobne do tych, które musiały przezwyciężyć zwierzęta. Najwcześniejsze rośliny, tak samo jak dzisiejsze paprocie, produkowały spory i ich rozmnażanie też wymagało wilgotnych warunków. Najprawdopodobniej żyły one w środowiskach przy-

brzeżnych, częściowo w wodzie lub przynajmniej w jej pobliżu. Rośliny rozmnażające się za pomocą spór były liczne w paleozoiku. Na przykład większość karbońskich pokładów węgla z półkuli północnej to pozostałości ogromnych drzew rosnących w bagnach, które rozmnażały się za pomocą spór. Pokłady te w powtarzających się cyklach warstw węglowych występują na przemian z osadami morskimi. Najwyraźniej nisko położone bagna węglowe były okresowo zalewane przez morze, co stanowi jeszcze jeden dowód zmian poziomu morza w paleozoiku. W skałach późnego paleozoiku istnieją świadectwa zlodowacenia w dużych szerokościach geograficznych i wielu geologów uważa, że szerokie rozprzestrzenienie geograficzne takich na-przemianległych pokładów węgla i osadów morskich jest skutkiem powiększania się i zmniejszania polarnych czap lodowych; proces ten powodował zmiany poziomu morza.

Kiedy rośliny przeniosły się ze swoich wodnych środowisk na kontynenty, musiały, podobnie jak zwierzęta, wytworzyć silniejsze struktury zdolne podtrzymać ich ciężar w powietrzu. Doprowadziło to do powstania grubych pni i drewna. Najważniejsze było powstanie systemu transportowania wody i pożywienia w owych pniach - tak zwanego systemu naczyniowego. Inne zdarzenie, pozwalające roślinom rozprzestrzeniać się szybko na kontynentach, to powstanie nasion; w pewnym sen-

sie jest to analogia do pojawienia się jaja gadów. Powstałe w okresie dewońskim nasiona pozwoliły roślinom na rozmnażanie się w pozbawionym wilgoci środowisku. Bardzo szybko pojawiły się duże drzewa - rośliny nasienne z grubymi, zdrewniałymi pniami i rozległym systemem korzeniowym. W efekcie powierzchnia lądów zaczęła wyglądać zupełnie inaczej. Gleba, jaką znamy, zawierająca duże ilości materiału organicznego, pochodzącego z gnijącej roślinności, pojawiła się po raz pierwszy na naszej planecie, gdy rośliny skolonizowały kontynenty. Choć rośliny i zwierzęta istniejące przy końcu ery paleozoicznej różniły się znacznie od dzisiejszych, to już wtedy Ziemia wydałaby się nam bardziej swojska niż na początku tej ery.

Przypuszczalnie najbardziej przypominającymi obecne formami życia w końcu paleozoiku były owady. Pojawiają się one

w zapisie kopalnym w okresie dewońskim wkrótce po pierwszych roślinach lądowych i zanim płazy rozpoczęły zasiedlanie kontynentów. Najwcześniejsze owady były bezskrzydłe, lecz w końcu paleozoiku istniały ważki, koniki polne i - wierzcie lub nie - karaluchy, które, podobnie jak zespoły bagienne, przeżywały rozkwit w okresie karbońskim. Zachowania owadów i środowiska, w których żyły, były silnie zróżnicowane nawet w paleozoiku, a ich ewolucja musiała być ściśle powiązana z rozwojem roślin i zwierząt lądowych. Dziś owady są najliczniejszymi stworzeniami na Ziemi.

Jednym z interesujących aspektów wyjścia życia na ląd jest jego związek z pojawiającą się dzisiaj często w mediach warstwą ozonową. Ozon jest cząsteczką złożoną z trzech atomów tlenu. Większość tlenu w atmosferze stanowi  $O_2$ , lecz energia promieniowania słonecznego powoduje jego rozpad w górnych warstwach atmosfery na poszczególne atomy. Ozon, czyli  $O_3$ , powstaje z połączenia tych atomów z cząsteczkami pozostałego  $O_2$ . Znaczenie warstwy ozonowej w górnej atmosferze dla życia na Ziemi wynika z tego, że cząsteczka  $O_3$  pochłania krótkofalowe (ultrafioletowe) promieniowanie Słońca. Bez tej ochrony większość form żywych na lądzie poważnie by ucierpiała lub nawet uległa zupełnemu wyniszczeniu w wyniku intensywnego promieniowania ultrafioletowego. Życie w oceanach jest znacznie mniej wrażliwe, ponieważ nawet stosunkowo mała warstwa wody jest skuteczną ochroną przed niszczącym promieniowaniem.

W rozdziale 4 opisano pochodzące z zapisu skalnego świadectwa wzrostu ilości tlenu w atmosferze przed mniej więcej dwoma miliardami lat. Większość geologów uważa jednak, że nawet we wczesnym paleozoiku tlen stanowił w atmosferze tylko drobny ułamek jego dzisiejszej zawartości. Okazuje się, że produkcja ozonu w górnych warstwach atmosfery osiąga maksimum, gdy zawartość tlenu przybliży się do 10% jego obecnej zawartości. Przy takiej koncentracji tlenu atmosferycznego

warstwa ozonowa najbardziej skutecznie chroni przed zabójczym promieniowaniem ultrafioletowym. Zgodnie z naszą obecną wiedzą, poziom ten został w przybliżeniu osiągnięty

w okresie sylurskim, kiedy na lądach pojawiły się pierwsze rośliny. Czy to tylko przypadkowa zbieżność? Najprawdopodobniej nie.

Z fragmentów historii paleozoiku, które zostały opisane w tym rozdziale, w sposób oczywisty wynika, że era ta była świadkiem rewolucyjnych zmian na Ziemi. W tym czasie życie skolonizowało kontynenty, prawie wszystkie połączone wówczas w jedną masę lądową, rozciągającą się od bieguna do bieguna (ryc. 8.4). Tworzeniu się tego gigantycznego kontynentu towarzyszyły silne epizody górotwórcze, wypiętrzając takie łańcuchy górskie, jak Appalachy i Ural. Przygotowana została scena dla ewolucji ssaków, dinozaurów i ptaków w erze mezo-zoicznej. Lecz paleozoik zakończył się nie skomleniem - przepraszam tu T. S. Eliota\* - lecz znacznie większym kataklizmem. Granica między erą paleozoiczną i mezozoiczną zaznaczona jest największym wymieraniem znanym w zapisie kopalnym. Ocenia się, że od 80 do 90% (!) gatunków żyjących w oceanach w końcu okresu permskiego nie przetrwało do

mezozoiku. Choć zapis kopalny jest znacznie mniej kompletny w wypadku roślin i zwierząt lądowych, wynika zeń wyraźnie, że one również poważnie ucierpiały. Mimo że zaproponowano wiele teorii, nie ma pewności co do przyczyn katastrofy, która dotknęła życie na Ziemi. Niektórym próbom wyjaśnienia tego i innych masowych wymierań przyjrzymy się bardziej szczegółowo w rozdziale 10.

## ROZDZIAŁ 9

OD PANGEI DO (PRAWIE)

WSPÓŁCZESNEGO ŚWIATA:

ERA MEZOZOICZNA

Kiedy około 250 milionów lat temu rozpoczęła się era me-zozoiczna, większość obecnych kontynentów, jak powiedziano w poprzednim rozdziale, była połączona w gigantyczną masę lądową - Pangeę. Pod jej koniec, 66 milionów lat temu -nie tak dawno w geologicznej skali czasu - świat fizyczny wyglądał bardzo podobnie do dzisiejszego. Istniały, oczywiście, pewne znaczące różnice: Indie były wielką wyspą na południe od równika, wędrującą w kierunku północnym, która ostatecznie zderzyła się z Azją, Australia zaś tworzyła wspólny ląd z kontynentem antarktycznym. Lecz mapa świata sprzed 66 milionów lat wygląda całkiem swojsko.

Mezozoik nazywany jest niekiedy wiekiem gadów. Choć istotnie żyło w tym czasie wiele gadów, najbardziej charakterystyczne były, szczególnie w czasie okresu jurajskiego, dinozaury, o czym zaświadczyć może każdy, kto czytał książkę *Park: Jurajski* lub widział film zrealizowany na jej podstawie. Koniec tej ery, podobnie jak koniec paleozoiku, zaznaczył się wielkim, masowym wymieraniem. Nie osiągnęło ono takich rozmiarów jak w końcu paleozoiku, lecz ponieważ objęło dinozaury, przyciągnęło uwagę zarówno naukowców, jak i zwykłych śmiertelników. Choć dinozaury osiągnęły niebawomy sukces ewolucyjny, ich koniec wydaje się zdumiewająco nagły, nieporównywalny

## 154 • KRÓTKA HISTORIA ZIEMI

z innymi zjawiskami wymierania w historii Ziemi. Jak to zobaczymy w następnym rozdziale, masowe wymieranie kończące mezozoik było rezultatem globalnej katastrofy. Gdyby nie to nieszczęśliwe zdarzenie, dinozaury mogłyby żyć wśród nas.

### **Pangea, klimat i rozpad superkontynentu**

W skałach z końca ery paleozoicznej można odnaleźć wiele świadectw niezwykle dużego obniżenia się poziomu morza podczas permu. Ponieważ kontynenty były wówczas połączone razem, tworząc Pangeę, wzdłuż grzbietów oceanicznych powstawało stosunkowo niewiele nowego dna morskiego. Młode grzbiety oceaniczne wyrastają ku górze, osiągając niewielkie głębokości i wypychając wody oceaniczne na kontynenty, starsze zaś dno morskie się obniża, dając odwrotny efekt; to mogło być powodem niskiego poziomu morza w permie. Istnieją również dowody, że w końcu paleozoiku i na początku mezozoiku klimat był dość suchy, szczególnie we wnętrzu kontynentu

Pangei. Część tych świadectw stanowi kopalna fauna i flora, a część skały osadowe powstające w tamtym okresie.

Jakie cechy skał świadczą o tym, że klimat był wówczas suchy i gorący? Ważną wskazówką są liczne piaskowce, szczególnie te, które są zlitfikowanymi wydrami piaszczystymi. Dziś wydmy piaszczyste występują w gorącym, suchym środowisku pustynnym i nie ma powodu, aby uważać, że w przeszłości było inaczej. Piaskowce mogą powstawać w bardzo różnych warunkach, lecz zwykle dość łatwo jest odróżnić te, które były niegdyś wydrami piaszczystymi, od tych, które osadzały się na plażach i w rzekach. Wiatr na przykład nie transportuje skutecznie dużych ziarn i kamyków, tak więc ziarna w wydmach piaszczystych mają małe rozmiary i są bardziej jednorodnie niż w wypadku piasków plażowych lub rzecznych. Co więcej, warstwowania, które odzwierciedlają sposób odkładania się osadów, są zupełnie odmienne w tych dwóch wypadkach. Choć jednak osady wydmore występowyły pospolicie w permie, nie stanowią one jedyne go dowodu na suchość klimatu. Liczne są

również ewaporaty, czyli osady soli, powstające, gdy zbiorniki wody morskiej, izolowane od otwartego oceanu, po prostu odparowują, pozostawiając po sobie jedynie rozpuszczone sole. Podobnie jak wydmy piaszczyste, ewaporaty są świadectwem ciepłych, suchych warunków klimatycznych.

Wśród geologów istnieje spór o znaczenie omawianych przed chwilą dowodów w rozumieniu globalnego klimatu pod koniec paleozoiku. Pangeę przecinał równik i wiele z ewaporatów oraz osadów wydmorewych powstało w małych szerokościach geograficznych. Być może klimat nie był szczególnie ciepły, a ich obecność jest jedynie rezultatem geograficznego położenia. Co więcej, wewnątrz wielkiej, kontynentalnej masy lądowej Pangei charakteryzował przypuszczalnie suchy klimat i duże różnice temperatur - gorące lata i chłodne zimy, - niezależnie od średniej globalnej. Tak więc trzeba być bardzo ostrożnym w interpretacji tych dowodów. Rekonstrukcja szczegółów ziemskiego klimatu sprzed ćwierć miliarda lat z wielką dokładnością nie jest prostą sprawą.

Pomijając szczegóły, wiemy, że kontynenty poruszały się wolno i że rozpad Pangei trwał bardzo długo. Wpływ tej wielkiej masy lądowej widoczny był jeszcze ciągle w mezozoiku. Ewaporaty, choć liczne w permie, pojawiały się jeszcze częściej w triasie. Ewaporaty triasowe stanowią jednak zapis nie tylko ciepłego i suchego klimatu, lecz dokumentują również początkowe stadia rozpadu Pangei. W miarę jak ów superkontynent powoli się rozpadał, tworząc ryfry, morze okresowo zalewało doliny ryf-towe. Albo z powodu zmieniającego się poziomu morza, albo dlatego, że połączenie z morzem zostało odcięte z innych przyczyn, owe zatopione ryfity czasami wysychały (szczególnie jeśli znajdowały się w ciepłych regionach), pozostawiając po



sobie charakterystyczne osady solne. W bliższych nam czasach dokładnie ten sam proces zachodził w Morzu Czerwonym, które jest ciągle dość młodym ryfem pomiędzy Egiptem i Arabią Saudyjską. We wczesnych stadiach był on również od czasu do czasu zalewany wodami oceanu, ulegającymi odparowaniu. Zapisem owych wtargnięć morza jest seria warstw soli, podścielających zwykle osady na dnie Morza Czerwonego.

Rozpad Pangei był głównym wydarzeniem geograficznym ery mezozoicznej. Zachodził wprawdzie powoli, lecz w sposób ciągły. Rozpoczął się rozdzieleniem Europy i Afryki, postępującym od wschodu na zachód, po czym nastąpiło stopniowe otwieranie się północnego Oceanu Atlantyckiego między Ameryką Północną, Europą i Afryką, które w końcu doprowadziło do oddzielenia się Ameryki Południowej od Afryki i powstania południowego Atlantyku. Z końcem tego procesu świat został zupełnie przekształcony; ta geograficzna reorganizacja miała poważne konsekwencje zarówno dla klimatu, jak i dla przebiegu ewolucji biologicznej. Cyrkulacja oceaniczna - główny mechanizm transportu ciepła na ziemskiej powierzchni z jednego regionu do drugiego - w wyniku nowego ułożenia kontynentów radykalnie się zmieniła. Nowo powstałe baseny oceaniczne stały się barierami dla życia roślinnego i zwierzęcego, szczególnie dla form zamieszkujących lądy, lecz miały również wpływ na gatunki morskie. Ponieważ rozpad Pangei był tak ważny dla naszego współczesnego świata i miał wpływ na wszystko, poczynając od rozprzestrzenienia zwierząt aż do obecnego klimatu, warto prześledzić szczegółowo, w jaki sposób postępował. Kolejne etapy ziemskiej geografii dla różnych przedziałów mezozoiku przedstawiono na rycinie 9. 1.

Pod koniec ery paleozoicznej część otaczającego kulę ziemską oceanu wcisnęła się od wschodu w Pangeę w rejonie, który jest dzisiaj Morzem Śródziemnym. W końcu to wtargnięcie rozszerzyło się dalej na zachód, rozdzierając Pangeę i rozdzielając Europę od Afryki. Powstały zbiornik wodny, rozciągający się ze wschodu na zachód, stał się samodzielnym morzem, znanym geologom jako Ocean Terydy lub Morze Tetydy. Jego powstanie miało zasadniczy wpływ na światowy klimat, ponieważ umożliwiło prądom oceanicznym przepływanie ze wschodu na zachód. Proces ryftowy postępował dalej na zachód, oddzielając Amerykę Południową od Ameryki Środkowej i Północnej, a zbiorniki wodne po obu stronach Pangei w końcu się połączyły. Baseny ryftowe, powstałe wraz z Oceanem Terydy, leżały w ciepłych obszarach na małych szerokościach geograficznych; okresowo zalewały je wody morskie we wczesnych

stadiach ich rozwoju, po czym ulegały odparowaniu, tworząc osady solne. Owe triasowe ewaporaty występują dziś wzdłuż

północno-zachodniej krawędzi Afryki oraz w wielu częściach Europy.

Ewaporaty mezozoiku pozwalają opisać sposób pęknięcia Pangei. Oznaczając ich wiek, geolodzy, zdołali prześledzić powstawanie ryftów, a zatem chronologię rozpadu kontynentu. Związek pomiędzy wczesnym tworzeniem się ryftów w wyniku rozpadu Pangei a osadami solnymi został po raz pierwszy jednoznacznie stwierdzony w 1975 roku przez Kevina Burke'a, pracującego wówczas na Uniwersytecie Stanu Nowy Jork w Albany. Szkic przedstawiający położenie ewaporatów, które według Burke'a powstały w wyniku rozpadu Pangei, i drogi, jakimi dostawała się do ryftów woda morska, widoczne są na rycinie 9.2. Wyobraźmy sobie dzisiejsze kontynenty - Amerykę Północną, Afrykę i Amerykę Południową - połączone razem, bez Atlantyku i Oceanów Śródziemnomorskich, tak jak to pokazano na rycinie 8.4. Jak stwierdziliśmy wcześniej, tak właśnie wyglądała sytuacja pod koniec ery paleozoicznej. Później rozpoczął się rozpad - od wschodu zaczął wcinąć się Ocean Tetydy. Ewaporaty osadzały się w wąskich ryftach poprzedzających pełny rozwój tego oceanu we wnętrzu Pangei; pochodzą one z okresu wczesnotriasowego i należą do najstarszych mezozoicznych osadów solnych. Północnoamerykańskie odpowiedniki tych osadów powstały, gdy, w wyniku rozpadu, Ameryka Północna oddzieliła się od Europy oraz północnej Afryki, i występują wzdłuż szelfu kontynentalnego wschodniej Kanady.

Z czasem proces powstawania ryftów przesunął się ku zachodowi i południu, obejmując obszar, który dziś stanowi region Zatoki Meksykańskiej w Stanach Zjednoczonych, aby w końcu oderwać Amerykę Południową od Ameryki Północnej. Dopiero znacznie później, w okresie jurajskim, powstały wielkie pokłady soli w Zatoce Meksykańskiej. Uważa się, że woda, z której wytrąciły się owe ewaporaty, wdarła się do ryftu od strony Pacyfiku. Osady te występują zarówno na dnie morskim zatoki, jak i na lądzie, pogrzebane są pod morskimi osa-

darni w Teksasie, Luizjanie i Meksyku. Ewaporaty Zatoki Meksykańskiej są szczególnie dobrze znane geologom, ponieważ w pewnych miejscach sól, z powodu swej niskiej gęstości, przebiła się w postaci wielkich bąbli przez otaczające skały osadowe, zaburzając je i tworząc pułapki, w których nagromadziły się duże ilości ropy. Te tak zwane wysady solne, pogrzebane pod powierzchnią ziemi i wykrywalne jedynie metodami geofizycznymi, są zatem atrakcyjnym miejscem poszukiwań ropy.

Jeszcze inną grupą ewaporatów powstała wtedy, gdy woda morska dostała się do wczesnego, wąskiego ryftu, który zapoczątkował oddzielenie się Afryki od Ameryki Południowej.

Tamtejsze osady są młodsze niż odpowiadające im osady w Europie czy u wybrzeży Zatoki Meksykańskiej w Stanach Zjednoczonych; datuje się je na początek okresu kredowego. Tak więc wiek osadów solnych wzdłuż krawędzi dzisiejszych kontynentów stanowi bardzo jasny i poglądowy zapis rozpadu Pangei. Ewaporaty to, oczywiście, nie jedyny ślad, chociaż szczególnie użyteczny, ponieważ są to osady morskie i ich wiek można zwykle dość dokładnie wyznaczyć na podstawie skamieniałości zawartych w normalnych osadach morskich gromadzących się na przemian z nimi.

Nie we wszystkich ryftach kontynentalnych panujące warunki doprowadzały do powstania ewaporatów. Niemniej nawet bardzo stare ryfty można zidentyfikować na podstawie typowego następstwa występujących w nich skał - zapisu ich ewolucji. Gdy skorupa ziemska zaczyna ulegać rozrywaniu, powstają osady, które znajdujemy w każdej dolinie ze stromymi stokami i obniżającym się podłożem: grube pokłady osadów zmywanych ze stoków doliny. Zwykle są to zlepieńce - mieszanina stosunkowo dużych fragmentów skalnych różnego typu i wielkości, scementowanych za pomocą drobnoziarnistego tła skalnego. W dużych ryftach często powstają również jeziora, pozostawiające po sobie stosunkowo drobnoziarniste osady. Dobrym przykładem dzisiejszego ryftu na tym etapie rozwoju jest Wschodnioafrykańska Dolina Ryftowa. Występują w niej liczne jeziora, z których największe to Tanganika i Niasa. W ryftach częsty jest wulkanizm, ponieważ w wyniku rozciągania i ścięcia skorupy kontynentalnej, gorący materiał płaszcz unosi się ku górze i zaczyna topić; i tu znowu dobrym przykładem jest Wschodnioafrykańska Dolina Ryftowa, upstrzona obecnie wulkanami, takimi jak Kilimandżaro. Tak więc typowe osady strefy ryftowej obejmują zlepieńce, osady jeziorne, skały wulkaniczne, jak również ewaporaty, jeśli rozwój ryftu posunął się odpowiednio daleko i pozwolił na wdarcie się wody morskiej. Czasami nigdy nie dochodzi do rozerwania skorupy kontynentalnej i wielka *blizna* ryftu wypełnia się stopniowo osadami, nie pozostawiając na powierzchni wielu śladów po nim. Jeśli jednak ryft rozwiera się dalej, dochodzi do stałego zalania

*przez wodę i ryft staje się samodzielnym morzem lub oceanem - co przydarzyło się ryftom Pangei, które przekształciły się w końcu w Ocean Atlantycki. Kiedy tak się dzieje, unikatowa sekwencja osadów, charakteryzująca wczesne stadia rozwoju ryftu, zachowana zostaje tylko w wąskich pasmach na przeciwnych krawędziach nowego basenu oceanicznego, które może dzielić tysiące kilometrów.*

## **Dziki Zachód**

Ze zdarzeń opisanych w rozdziale 8 w sposób oczywisty wynika, że wschodnia część Ameryki Północnej, w sensie geologicznym, była w erze paleozoicznej bardzo aktywnym regionem. Łańcuchy górskie Appalachów, powstałe w czasie łączenia się kontynentów w Pangeę, są dziedzictwem zachodzących tam zdarzeń. Jednakże historia ponownego rozpadu Pangei wyglądała zupełnie inaczej. Bez wątplenia wzdłuż krawędzi rozpadającego się kontynentu występowały zjawiska wulkaniczne, lecz w miarę, jak ryft się poszerzał, owa krawędź odsuwała się coraz dalej od brzegu płyty, a zatem i od miejsca aktywności geologicznej. Wschodnie wybrzeże Ameryki Północnej stało się krawędzią pasywną, a miejsce akcji przesunęło się na zachód.

Duży fragment skał kontynentalnych w mezozoiku dołączony został do ówczesnej Ameryki Północnej wzdłuż zachodniego wybrzeża, od Meksyku po Alaskę. Stało się to jednak nie w wyniku scalenia mas kontynentalnych, tak jak w przypadku Afryki, Europy i obu Ameryk, które razem utworzyły Pangeę. Zaszło to raczej wskutek stopniowego przyłączania wielkiej ilości małych fragmentów skorupy. Nie jest wykluczone, że taki proces zachodzi obecnie na zachodnim Pacyfiku. Gdyby pchnąć wszystkie łuki wysp i mikrokontynenty, poczynając od Kamczatki i Japonii aż po wyspy Andaman, na masę lądową Azji, rezultat mógłby przypominać to, co wydarzyło się w zachodniej części Ameryki Północnej podczas mezozoiku.

Geolodzy nazwali małe fragmenty skał kontynentalnych, które zostały „pozszywane” z wielkimi blokami kontynentalnymi,

mi. „egzotycznymi” lub „przemieszczonymi” terranami. Obydwie nazwy wskazują na niezwykle charakter owych bloków. Rozpoznano je, ponieważ kontrastują ze swym otoczeniem i mają zwykle inny wiek, zawierają inne skałności i są zbudowane z odmiennych typów skał niż sąsiednie fragmenty skorupy. Egzotyczne terrany nie są cechą wyłącznie zachodniej części Ameryki Północnej - rozpoznano je również w Appalachach i wielu innych regionach. Lecz zachodnią część Ameryki Północnej, gdzie stwierdzono występowanie 200 (!) takich fragmentów, jest klasycznym przykładem. Większość tych egzotycznych fragmentów kontynentalnych została dołączona do kontynentów w mezozoiku. Rycina 9.3 pokazuje tylko niektóre ze zidentyfikowanych bloków.

Taka mozaika fragmentów kontynentalnych czyni geologię zachodniej części Ameryki Północnej bardzo złożoną. Główny zarys jej historii łatwo jednak odtworzyć. Przez większą część mezozoiku wzdłuż całej zachodniej krawędzi kontynentu istniała strefa subdukcji. Dno morskie było wpychane w głąb do płaszcza, ciągnąc za sobą wszystkie napotkane wyspy lub mikrokontynenty. W przeciwieństwie jednak do skorupy oceanicznej, materiały te nie miały odpowiednio dużej gęstości, aby zagłębić się w płaszczy, i zostały dołączone do kontynentu w momencie, kiedy osiągnęły zachodnią krawędź Ameryki Pół-

nocnej. *Znane* są świadectwa istnienia wielu stref subdukcji mniej lub bardziej równoległych do wybrzeża - każda z łańcuchem wysp wulkanicznych wytwarzających skorupę, która w końcu zderzyła się z Ameryką Północną i została do niej dołączona. Egzotyczne terrany zawierają bardzo różne materiały, obejmujące nie tylko skały wulkaniczne, podobne do występujących dziś na łukach wysp, lecz również osady oceaniczne, a czasami pasma skorupy oceanicznej, schwyte między zbiegającymi się płytami i nasunięte na kontynent w kierunku wschodnim. Most Golden Gate w San Francisco wzniesiono na takim właśnie fragmencie. Nawet w samym San Francisco można zaobserwować wiele interesujących geologicznych świadectw zdarzeń, zachodzących podczas mezozoiku wzdłuż Zachodniego Wybrzeża. Clyde Wahrhaftig z Uniwersytetu Kalifor-

nijskiego w Berkeley opublikował mały przewodnik, opisujący niektóre z nich, zatytułowany *A Streetcar to Subduction* (*Autobus miejski do subdukcji*). Charakterystyczną skałą stanu Kalifornia jest serpentynit, miękka szarzielona skała o dużej gęstości, występująca zwykle tam, gdzie w strefie subdukcji dno oceaniczne nasunęło się na skorupę kontynentalną. Jest to skała pospolita w wielu miejscach w San Francisco, opisanych w przewodniku terenowym Wahrhaftiga. Powstaje ona w wyniku oddziaływania wody ze skałami najwyższej części płaszczka i jej obecność w strefach subdukcji oznacza, że fragmenty litosfery oceanicznej, nasunięte na kontynenty w czasie zderzeń, są wystarczająco grube, aby zawierały zarówno materiał skorupy, jak i płaszczka.

Oprócz dołączenia egzotycznych terranów do kontynentów, zachodnia część Ameryki Północnej zyskała również w czasie mezozoiku nowy materiał pochodzenia wulkanicznego. Położonej w morzu strefie subdukcji towarzyszył pas aktywności wulkanicznej na lądzie, podobnie jak dzisiaj w Andach. W okresie jurajskim i kredowym ten obszar wulkaniczny rozciągał się od Alaski do Meksyku, tworząc szeroki i malowniczy łańcuch górski. Wypiętrzenie i erozja usunęły większość skał wulkanicznych i pozostały tylko małe fragmenty, świadczące o ich wieku i pochodzeniu. Lecz korzenie tych wielkich gór - ogromne masy skał granitowych, które uległy krystalizacji i zastygły głęboko w skorupie poniżej szczytów aktywnych wulkanów - są dziś odsłonięte na powierzchni. Jedną z takich najbardziej znanych pozostałości są góry Sierra Nevada, wielka czerwona i różowa plama na geologicznych mapach Kalifornii. Park Narodowy Yosemite, będący Mekką turystów i wspinaczy, znajduje się w sercu Sierra Nevada. Choć tamtejsze skały, tak ukochane przez przyrodnika Johna Muira i późniejsze pokolenia turystów, ostatecznie zawdzięczają swoje powstanie zdarzeniom w mezozoiku, ich obecna rzeźba jest znacznie bardziej współczesnym

wytworem. Już w erze kenozoicznej, 40-45 milionów lat temu, pozostało niewiele śladów wielkiego łańcucha górskiego, a duże rzeki w drodze do morza przecinały w poprzek to miejsce, które dziś jest granicą Sierra Nevada. Geolodzy, badający ewolucję zachodniej części Stanów Zjednoczonych, spierają się o dokładne początki wypiętrzania, któremu zawdzięczamy obecny łańcuch górski, lecz wydaje się, że przebiegało ono głównie w ciągu ostatnich pięciu milionów lat. Cały ogromny blok skorupy tworzącej Sierra Nevada został wyniesiony i przechylony w kierunku zachodnim w wyniku reakcji na postępujące przegrupowanie sił w zachodniej części Ameryki Północnej, związane ze zmianami na granicy płyty - od strefy subdukcji wzdłuż wybrzeża do uskoku przekształcającego San Andreas - rozpoczętymi 30 milionów lat temu (ryc. 5.6). Malownicze głębokie doliny i kaskady w Sierra Nevada są jeszcze młodsze. Zostały wyrzeźbione w wyniesionym bloku granitowym w ciągu ostatnich 2-3 milionów lat przez następujące i cofające się lodowce. Za 100 milionów lat pokryte śniegiem, wulkaniczne szczyty Andów także przestaną istnieć i być może również tam pozostaną jedynie odsłonięte przez erozję, granitowe wnętrza wielkich wulkanów, budząc zdumienie przyszłych mieszkańców Ziemi.

## Historia mezozoicznych gadów

Gdy pękała Pangea, a środowisko ziemskie zaczęło przypominać świat dzisiejszy, gwałtowne zmiany zachodziły również w świecie biologicznym. Z morza zniknęły trylobity i wiele innych zwierząt występujących przez większość ery paleozoicznej. Na lądzie zaczęły dominować lasy z roślinami nasiennymi, takimi jak sagowce i miłorzębowe (te ostatnie przypuszczalnie wyginęły w stanie naturalnym, choć są w wielu rejonach popularnymi drzewami ogrodowymi), jak również bardziej nam znane szpilkowe, a pod koniec tej ery liczne stały się rośliny kwiatowe. Lecz głównym elementem krajobrazu w mezozoiku były gady. Jak żadna inna grupa wcześniej zdominowały lądy, morza, a nawet przestworza.

Stwierdziliśmy w poprzednim rozdziale, że gady pojawiły się pod koniec paleozoiku i wywodzą się z płazów. Najważniejszym aspektem ich rozwoju było powstanie jaja, składanego poza wodą - tak zwanego jaja owodniowego, które swą nazwę

zawdzięcza błonie otaczającej i chroniącej embrion oraz płynom, w których się on znajduje. Jest to dobrze znane nam jajo, takie jak to, które zjadamy na śniadanie. Kurczaki i wszystkie inne ptaki są potomkami pierwszych gadów.

Powstanie jaja owodniowego, jak również skóry, pokrytej łuskami, dającej znacznie lepszą ochronę przed wysychaniem, pozwoliło gadom rozprzestrzenić się na wszystkich kontynen-

tach i zasiedlić środowiska nieodpowiednie dla płazów. Wiele gadów było roślinożercami, a duża już wówczas różnorodność życia roślinnego na kontynentach stanowiła łatwo dostępne źródło pożywienia. Niektóre wczesne gady powróciły do morza i przystosowały się do morskiego trybu życia, stając się przypuszczalnie sprawnymi pływakami i drapieżnikami. Ponieważ żyły w morzu, wiele z nich pozostawiło po sobie dobry zapis kopalny i są często wystawiane w muzeach. Niektóre gady były ogromne i osiągały rozmiary dzisiejszych wielorybów. Jest wielce prawdopodobne, że opowieści o potworach morskich są wytworem wyobraźni pobudzonej widokiem skamieniałości owych mezozoicznych stworzeń.

Historia gadów przebiegała jednak głównie na lądach. I co zaskakujące, choć to dinozaury stały się nieco później dominującymi gadami, zupełnie inna grupa osiągnęła w początkach tej ery sukces. Były to tak zwane gady ssakokształtne; z tej właśnie grupy wywodzą się prawdziwe ssaki, a zatem i ludzie. Pojawiły się one w końcu ery paleozoicznej i uległy dość dużemu różnicowaniu, mimo że ich liczba została znacznie zredukowana podczas masowego wymierania kończącego tę erę. Odzyskały one jednak znaczenie i rozkwitły ponownie w triasie. Były najwyraźniej głównie roślinożercami, choć niektóre przypuszczalnie żerały płazy, inne gady i jaja. Gady ssakokształtne osiągały na ogół duże rozmiary - jak dzisiejszy hipopotam lub większe - ich skamieniałości sugerują jednak, że były też stosunkowo niezdarne: ich mało efektywny, w porównaniu z dinozaurami, sposób lokomocji mógł przyczynić się do ich wyginięcia. Kopalne szkielety świadczą o tym, że odnoża gadów ssakokształtnych wyrastały z boków ciała. Poruszały się więc niezgrabnie w porównaniu z dinozaurami, które miały nogi pod korpusem.

Gady ssakokształtne składały jaja, lecz ich inne cechy niezbyt pasują do naszych wyobrażeń o gadach. Niektóre z nich pokryte były przypuszczalnie włosami, co jest cechą typową ssaczy, a najprawdopodobniej cechowała je także stałocieplność lub przynajmniej zdolność regulowania do pewnego stopnia temperatury ciała. Prawie wszystkie te stworzenia wymarły pod koniec okresu jurajskiego, pozostawiając nam swych potomków - prawdziwe ssaki, które, mimo że przeżyły, były przeważnie małe i niepozorne przez resztę ery mezozoicznej. W jurze zaczęło dominować inne główne odgałęzienie rodziny gadów - dinozaury. I choć sława dinozaurów przytłumiła gady ssakokształtne, warto pamiętać, że w triasie były one najważniejszymi stworzeniami na lądach przez okres równie długi jak później dinozaury. Te nieszczęśliwie piękne zwierzęta są naszymi najpradawniejszymi przodkami. Aby zachować nieco dystansu wobec siebie samych, warto przyjrzeć się naszemu triasowemu przodkowi na rycinie 9.4.

Skamieniałości dinozaurów zostały po raz pierwszy znalezione na początku XIX wieku; nadano im nazwę pochodzącą z Grecji i oznaczającą straszną (*deinós*) jaszczurkę (*sairos*).

Najwyraźniej za życia, co możemy sobie wyobrazić na podstawie skamieniałości, wydawały się przerażające. Jak wkrótce

się jednak przekonamy, nie wszystkie dinozaury *przerażały* swym ogromem, a wiele z nich przypuszczalnie nie odbiegało znacznie wyglądem od pospolitych ówczesnych zwierząt.

Najstarsze skamieniałości dinozaurów pochodzą z dość wczesnej części okresu triasowego - sprzed 240 milionów lat. Paleontolodzy zidentyfikowali dwie główne gałęzie rodziny dinozaurów na podstawie struktury ciała oraz sposobu ułożenia miednicy i stawu biodrowego. Tak zwane dinozaury gadzio-miedniczne obejmowały zarówno ogromne drapieżniki, takie jak słynny *Tyrannosaurus rex*, jak i mniej srogie roślinożerne stworzenia. Dinozaury ptasiomiedniczne były roślinożerne; to tak dobrze znane nam formy, jak *Stegosaurus* i *Triceratops*.

W ostatnich latach wiele stereotypowych poglądów na temat dinozaurów zostało odrzuconych, lub przynajmniej zakwestionowanych, w świetle nowych dowodów. Przekonanie, że dinozaury były wolno się poruszającymi, tępymi, żyjącymi w pojedynkę stworzeniami, zmuszonymi do brodzenia w bagnach, ponieważ nie mogły unieść swego ogromnego ciężaru na lądzie, zostało obalone dzięki współczesnym badaniom. W rzeczywistości wiele dinozaurów wykazywało znaczną ruchliwość. Najwyraźniej wielkie ciała nie przeszkadzały im wędrować po łąkach, a niektóre z nich charakteryzowały się zachowaniami społecznymi, przemieszczając się w stadach, budując gniazda i opiekując się swoimi młodymi. Mogły być również stałocieplne.

Kiedy dinozaury pojawiły się w triasie, większość z nich nie była większa od kota lub małego psa. Przeważnie poruszały się szybko na dwóch nogach. W przeciwieństwie do naszych praprzodków, gadów ssakokształtnych, nogi najwcześniejszych dinozaurów umiejscowione były raczej pod korpusem niż rozstawione na boki. Skamieniałe tropy dinozaurów często tworzą położone z dala od siebie w linii prostej odciski stóp, wspierając wniosek wynikający z *analizy* skamieniałości, że gady te poruszały się szybko i skutecznie.

Wiele małych, ruchliwych, wczesnych dinozaurów odżywiało się mięsem, polując na inne gady i płazy, a przypuszczalnie pożerając również niektórych bliskich krewniaków spośród roślinożernych, ptasiomiednicznych dinozaurów. Wiele z nich

rozwinęło później imponujące środki ochrony przed ewentualnymi drapieżnikami, na przykład *Stegosaurus* miał solidny pancerz i groźnie wyglądające kolce na ogonie, a *Triceratops* ostre rogi (patrz ryc. 9.5). Nawet w mezozoiku obiady nie były



darmowe - mięsożercy musieli zapracować na pożywienie.

Jednym z problemów w rekonstruowaniu historii dinozaurów jest ich nieciągły zapis kopalny. W przeciwieństwie do środowiska morskiego, gdzie szczątki organizmów często zostają szybko pogrzebane i dzięki temu się zachowują, kontynenty mniej sprzyjają przetrwaniu pozostałości po padłych zwierzętach. Zwykle drapieżniki i padlinożercy obgryzają ich kości do czysta oraz rozwłóczą szczątki na dużym obszarze. W końcu

nawet kości się rozpadają, jeśli są wystawione na działanie czynników atmosferycznych na powierzchni ładu przez długi czas. Przepada w ten sposób na zawsze ślad po ich dawnych właścicielach. A strumienie i rzeki mogą przenosić szczątki zwierząt daleko od ich pierwotnego środowiska, utrudniając rekonstrukcję środowiska, w którym owe stworzenia żyły.

Mimo to wiele się dowiedzieliśmy. Odkryto jaja dinozaurów, a nawet ich „gniazda”; w niektórych oprócz jaj były młode. Odciski stóp dinozaurów dostarczyły ważnych informacji o sposobie ich poruszania, świadcząc jednocześnie, że dinozaury przemieszczały się także w grupach. W zachodniej części Stanów Zjednoczonych skamieniałe tropy dinozaurów sugerowały nawet, że przynajmniej część z nich mogła migrować w różnych porach roku w dużych stadach, podobnie jak robiły to bizona kilkadziesiąt lat temu lub dziś karibiu w Arktyce.

Jedną z największych kolekcji skamieniałości dinozaurów, jaką kiedykolwiek zgromadzono, pochodzi z osadów złożonych na ogromnych, nisko położonych obszarach zachodniej części Stanów Zjednoczonych, głównie na terenie dzisiejszych stanów Utah, Wyoming i Kolorado. Owe osady pochodzenia kontynentalnego powstały w wodach słodkich jezior i rzek, a nie w morzach. W czasie ich gromadzenia się, ku zachodowi, następowały fałdowania, wypiętrzanie, przejawiał się wulkanizm związany z subdukcją i dobudowywaniem egzotycznych terranów do zachodnich krawędzi kontynentu, o których to procesach mówiliśmy już w tym rozdziale. Przez część jury ogromne ilości mułu i piasku, pochodzące z erozji tego wyniesionego ładu na zachodzie, transportowane były na niziny, dostarczając surowca dla mułowców i piaskowców, w których pogrzebane zostały szczątki żyjących tam dinozaurów. Zachowane skamieniałości są liczne i zróżnicowane; przyniosły wiele informacji o sposobie życia tych wielkich zwierząt. Wyłaniający się z tego obraz jest jurajskim odpowiednikiem wschodnioafrykańskiego wędru: ogromny obszar tętniący życiem z dużą liczbą roślinożernych dinozaurów, będących odpowiednikami żyraf, zebra i gnu w dzisiejszej Afryce, oraz mają populacją drapieżników, takich jak *Tyrannosaurus*, jurajski „król zwierząt”.

W czasie ich długiego panowania na Ziemi - prawie 180 mi-

lionów lat - dinozaury podlegały różnicowaniu i ewolucji. Te z końca okresu kredowego nie rozpoznałyby swoich triasowych przodków. Ale prawie wszystkie główne grupy dotrwały do końca kredy, uwiarygodniając hipotezę, że ich wymarcie było spowodowane raczej krótkotrwałym zdarzeniem katastroficznym niż powolnymi zmianami ewolucyjnymi.

Jednym z najbardziej widocznych trendów w zapisie kopalnym dinozaurów jest zmiana rozmiarów ich ciała. Jak już wspomniano, najwcześniejsze dinozaury były na ogół małe; większość znanych nam wielkich okazów tych zwierząt z muzeów i Parku *Jurajskiego* żyło pod koniec jury i w kredzie. Nie wiadomo dokładnie, dlaczego występował trend ewolucyjny w kierunku powiększania rozmiarów, choć przedstawiono wiele hipotez, począwszy od pomysłu, że większe ciała i dłuższe szyje były konieczne, aby dosięgnąć pożywienia na wysokich drzewach, aż po sugestie, że duże rozmiary stanowiły ochronę przed drapieżnikami (lub inaczej - umożliwiały dominację nad innymi). Duże dinozaury były naprawdę ogromne; ocenia się, że ważyły 80-100 ton!

Rozmiary osiągane przez wiele z tych zwierząt kierują dyskusję ku problemowi, czy były one stałocieplne, czy nie, ponieważ jedną z konsekwencji dużych rozmiarów jest stabilność termiczna. Zwierzęta tracą ciepło przez powierzchnię swego ciała, a dobrze znana zależność między powierzchnią zewnętrzną a objętością (ściśle związana z ciężarem) powoduje, że po nagłej zmianie temperatury legwan szybciej może doprowadzić swe ciało do równowagi termicznej ze środowiskiem niż mogłyby to uczynić 80-tonowy *Brontosaurus*. Z tego samego powodu znacznie trudniej dużemu zwierzęciu pozbyć się ciepła wytwarzanego w procesach metabolicznych. Na tej podstawie sugerowano, że niektóre cechy anatomiczne dinozaura, takie jak niezwykle trójkątne płyty na grzbiecie stegozaurusa, tak wyraźnie widoczne na rycinie 9.5, służyły do wymiany termicznej. Pomysł ten nie jest zbyt oryginalny, ponieważ szczegółowe badania skamieniałości wykazały, że owe struktury kostne były silnie unaczynione. Stegozaurus nie należał jednak do szcze-

gólnie dużych dinozaurów, a nic podobnego do owych przedziwnych grzbietowych płyt nie pojawia się w innych grupach dinozaurów; tak więc prawdziwa ich funkcja pozostaje ciągle niejasna.

Niemniej istnieją silne dowody pośrednie, że przynajmniej niektóre dinozaury regulowały temperaturę swego ciała. Jedną z takich wskazówek *związana* jest z odległością między sercem a mózgiem. Jest oczywiste, że u wielu dinozaurów musiała ona być duża, czasami nawet wynosiła kilka metrów, a co więcej - była to odległość w pionie. Aby dostarczyć świeży tlen do komórek mózgu, bez *czego* zwierzę umarłoby, ciśnienie krwi musiałoby być dość wysokie. Choć miękkie części systemu naczyniowego dinozaurów nie zachowały się jako skamieniałości, z tego

pośredniego wnioskowania wynika, że potrafiły one wydajnie pompować krew z serca do płuc przy niskim ciśnieniu oraz z serca do mózgu przy wysokim ciśnieniu. Krótko mówiąc, musiały mieć system naczyniowy, przypominający ten, który występuje u stałocieplnych zwierząt o szybkim metabolizmie. Pomimo tych dowodów nigdy nie zdobędziemy ostatecznej pewności, ponieważ - przepraszam tutaj Michaela Crichtona - jest nieprawdopodobne, aby ktokolwiek zmierzył temperaturę dinozaurowi.

Choć panowanie dinozaurów zaznaczyło się silnie w historii, nie było jedynym ważnym wydarzeniem w mezozoiku. Wspomnieliśmy już o gadach ssakokształtnych, które pojawiły się przed rozpoczęciem mezozoiku. Trzy inne grupy organizmów są równie godne omówienia, choć w książce tych rozmiarów nie jest możliwe poświęcenie im (oraz wielu innym, nawet nie wspomnianym tutaj grupom) uwagi, na którą zasługują. Są to ptaki, owady i rośliny kwiatowe.

## Ptaki i pszczoły

Uważamy ptaki za coś zwykłego. Niemniej nikt, kto obserwował pelikana szybującego nad oceaniczną falą lub jastrzębia spadającego z ogromną prędkością na swoją ofiarę, nie może

oprzeć się zdziwieniu, jak po mistrzowsku opanowały one przestworza. Lecz przecież pierwsze ptaki pojawiły się na niebie w późnej jurze, około 140-150 milionów lat temu. Owady znacznie wcześniej odkryły zalety latania, a zanim pojawiły się prawdziwe ptaki, latały niektóre gady, podczas gdy pozostałe zamieszkiwały powierzchnię Ziemi albo ocean. Pierwszymi latającymi kręgowcami były prawdziwe gady, u których jeden z palców kończyn przednich bardzo się wydłużył, tworząc podporę rozciągniętego płata skóry, służącego jako skrzydło. Były to pterozaurowe, co dokładnie oznacza „uskrzydłone jaszczurki”. Pterozaurowe pojawiły się pod koniec triasu, około 70 milionów lat wcześniej niż pierwsze znane prawdziwe ptaki, i przypuszczalnie dominowały w przestworzach aż do chwili, kiedy zostały zastąpione przez ptaki. Podobnie jak dinozaurowe, niektóre pterozaurowe osiągnęły gigantyczne rozmiary; największy odkryty skamieniały pterozaur to osobnik, którego rozpiętość skrzydeł wynosiła przeszło 15 metrów, czyli więcej niż niejednego samolotu! Owe latające gady miały duże szczęki uzbrojone w zęby, lecz ich ciała były małe i przypuszczalnie pozbawione wystarczająco silnych mięśni, które pozwalałyby na długotrwałe ruchy skrzydeł. Musiały one świetnie szybować, lecz niezbyt dobrze latały i były uzależnione od wiatru.

Ptaki powstały zupełnie niezależnie od pterozaurów i osiągnęły znacznie większy sukces, opanowując całkowicie przestworza.

Są one przykładem częstego w ewolucji zjawiska, to znaczy mniej lub bardziej równoległego rozwoju różnych typów struktur i funkcji ciała z tego samego powodu - w tym wypadku chodzi, oczywiście, o latanie. I choć jak zwykle zapis kopalny nie jest wystarczająco kompletny, aby szczegółowo prześledzić linię ewolucyjną ptaków, jest on jednak lepszy niż w wypadku wielu innych grup zwierzęcych. Zawdzięczamy to niezwykle zachowaniu się *Archaeopteryx* w wapieniach z kamieniołu w południowych Niemczech, skamieniałości, którą wielu uważało za brakujące ogniwo między dinozaurami a ptakami. I rzeczywiście, gdyby nie wspomniały sposób zachowania tych skamieniałości, mogłyby one zostać zaliczone do dinozaurów. Mają czaszkę i zęby gada oraz kostny ogon, lecz

drobnoziarnisty wapień, w którym występują owe skamieniałości, zachował delikatne odciski piór i drobne szczegóły struktury kostnej i nie ulega wątpliwości, iż *Archaeopteryx* był ptakiem. Wszystkie współczesne ptaki, począwszy od wielkich kondorów w Andach aż do najmniejszego wróbelka w naszym ogrodzie, pochodzą od mezozoicznych dinozaurów.

*Archaeopteryx* to niezwykle szczęśliwe odkrycie dla paleontologów, ponieważ skamieniałości ptaków są rzadkie. Niemniej pozwalają one stwierdzić, że w kredzie ptaki zawiadnęły po pterozaurach przestworzami. To właśnie wówczas wytworzyły one mocne, lecz lekkie, szkielety, zbudowane z pustych kości, charakterystyczne dla współczesnych ptaków i pozwalające im latać znacznie aktywniej, niż dane to było ich przodkom czy pterozaurom.

Bardziej niepozornymi, choć znaczącymi mieszkańcami me-zozoicznych przestworzy były owady, które pojawiły się na scenie dużo wcześniej, bo w paleozoiku. Wprawdzie zle zniosły masowe wymieranie w końcu okresu permskiego i były nieliczne na początku mezozoiku, lecz szybko się otrząsnęły, a ich zróżnicowanie wzrastało w ciągu całej tej ery.

Owady powiązane są z roślinami złożonymi zależnościami. Niektóre z nich żywią się szczątkami roślin, inne są szkodnikami niszczącymi określone gatunki roślin. Pewne owady są symbiontami, wykonując funkcje o zasadniczym znaczeniu dla roślin, stanowiących ich źródło pożywienia. Często widzimy owady *razem* z kwiatami lub owocami - robaki *zdarzają* się w jabłku, a pszczoły w kwiatkach - lecz w mezozoiku przez dłuższy czas nie było roślin kwiatowych. Krajobraz z paprociami, sagowcami, miłorzębem i roślinami szpilkowymi musiał być przyjemnie, lecz jednostajnie zielony. Niemniej szczegółowe badania skamieniałości wykazują, że ogromny wachlarz mechanizmów i sposobów odżywiania się dzisiejszych owadów istniał niemal w całości, zanim powstały rośliny kwiatowe. Było to zaskakujące odkrycie, ponieważ długo zakładano, że pojawienie

się roślin kwiatowych, musiało stanowić silny impuls w ewolucji owadów. Chociaż jednak wiele przystosowań i wzajemnych zależności rozwinęło się pomiędzy konkretnymi roślinami kwiatowymi i owadami, przypuszczalnie z pojawienia się kwiatów skorzystały raczej rośliny niż owady. Kwiaty przyciągały owady, odnosząc wielkie korzyści rozrodcze z przenoszenia pyłku z jednej rośliny na drugą, co powodowało zapylenie.

Rośliny okrytozalążkowe pojawiły się około 100 milionów lat temu w kredzie. Stały się one bardzo szybko dominującym typem roślinności na lądach i są nim do dzisiaj. Zasiadają różne środowiska, od suchych pustyń do wilgotnych lasów równikowych i występują od równika po Arktykę. Nie wszystkie wytwarzają ten rodzaj kwiatów, które można znaleźć w kwaciarniach, lecz mają wspólną cechę rozrodczą: nasienie chronione jest przez okrywę i otoczone łatwo dostępnym zapasem pożywienia. Rośliny kwiatowe wytworzyły niesłychany wachlarz kolorów, zapachów i owoców; to wynik ich złożonych relacji ze światem zwierząt. Nie tylko owady pomagają je zapylić, również ptaki i inne zwierzęta roznoszą nasiona na znaczne odległości. Świat byłby ubogi bez występujących dziś licznych i różnorodnych roślin kwiatowych.

## Mezozoiczne oceany

Zakończmy tę krótką wycieczkę po mezozoicznej ziemi kilkoma uwagami dotyczącymi życia w morzach. Podobnie jak na lądach, zachodziły tam radykalne zmiany. Być może najważniejsza z nich nastąpiła pod koniec tej ery wśród małych organizmów, zasiedlających najwyższe, nasłonecznione partie oceanów i zwanych planktonem. Termin „plankton” jest bardzo pojemny i oznacza wszystkie małe rośliny i zwierzęta zawieszony w toni oraz takie, które słabo poruszają się w wodzie. W kredzie nastąpiła ogromna ekspansja planktonu, budującego szkielety lub muszle z dwóch typów minerałów: krzemionki i węglanu wapnia. Węglan wapnia, jak już powiedziano, stanowi główny składnik wapieni; krzemionka ( $\text{SiO}_2$ ), będąca chemicznie tym samym co kwarc, jest głównym składnikiem skał, zwanych czertami. Rozwój planktonu radykalnie zmienił typy osadów gromadzących się na dnie morskim, ponieważ w prze-

ciwleństwie do organicznych części planktonu, które ulegają rozkładowi po śmierci, ich zmineralizowane szkielety często się zachowują i opadają na dno. Po raz pierwszy w długiej historii Ziemi bardzo duże ilości szkieletów krzemionkowych zaczęły gromadzić się w niektórych częściach głębokiego morza, przestając się w końcu w twarde czerty. Jak nigdy przedtem, gromadziły się też grube osady mułów głębinowych, składające

się z drobniotkich szczątków planktonu wytrącającego węglan wapnia. Słynne białe kredowe klify z Dover w południowo-wschodniej Anglii są tylko jednym z przykładów ogromnych ilości takiego materiału nagromadzonego podczas kredy; jest ich o wiele więcej. W rzeczywistości okres kredowy (w języku angielskim *Cretaceous*) bierze swą nazwę od łacińskiego słowa *creta*, oznaczającego kredę. Nie rozumiemy jednak do końca, dlaczego wapienny plankton był tak liczny w późniejszej części okresu kredowego. Od tego momentu nigdy już nie osadziły się tak ogromne ilości osadów kredy w porównywalnym odstępie czasu.

Wysoka produktywność biologiczna kredowych oceanów stwarzała również idealne warunki do gromadzenia się ropy naftowej powstającej, gdy materiał organiczny w osadzie zostaje powoli pogrzebany i poddany działaniu wysokich temperatur i ciśnienia, zamieniających szczątki organiczne w ropę. Osady wzdłuż krawędzi Oceanu Tetydy - tropikalnego oceanu rozciągającego się ze wschodu na zachód, który powstał w wyniku rozpadu Pangei w mezozoiku i przetrwał aż do kenozoiku - były bogate w materię organiczną. Wiele znanych dzisiaj pól naftowych - w Rosji, na Bliskim Wschodzie, w Zatoce Meksykańskiej oraz w Teksasie i Luizjanie - występuje w tych osadach.

Jak już wspomniano, wydaje się, że mezozoik zakończyła globalna katastrofa, która zmiotła z powierzchni Ziemi wiele gatunków roślin i zwierząt, łącznie z dinozaurami. Nie wiemy dokładnie, w jaki sposób te nagłe, masowe wymierania nastąpiły, lecz najprawdopodobniej odpowiedzialnością za nie można przynajmniej częściowo obarczyć, jak to przedyskutujemy w następnym rozdziale, uderzenie w Ziemię dużego ciała kosmicznego. Zaskakujący, lecz szczęśliwy dla nas los sprawił, że ssaki zostały najwyraźniej słabo dotknięte tym globalnym kryzysem. My, potomkowie tych, które przeżyły, możemy w końcu zgromadzić wystarczającą liczbę występujących w skałach dowodów, aby stwierdzić, czemu tak się stało.

## ROZDZIAŁ 10

### GLOBALNE KATASTROFY

Granice pomiędzy erami, okresami, a nawet drobniejszymi jednostkami w geologicznej skali czasu, zostały zdefiniowane na podstawie nagłych zmian w zapisie kopalnym. Jak się przekonaliśmy we wcześniejszych rozdziałach, obie ery, paleozoiczna i mezozoiczna, zakończyły się wielkimi wymierania-mi, w czasie których zagładzie uległa znaczna część istniejących na Ziemi gatunków. Trudno nie dojść do wniosku, że musiały wówczas panować warunki wyjątkowo nie sprzyjające życiu ziemskiemu. Choć geolodzy wiedzieli o tych faktach od dawna i wiele napisano na temat możliwych ich przyczyn, problem masowych wymierań przybrał nieoczekiwany obrót w 1980 roku. Louis Alvarez, laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley, wraz ze swymi kolegami geologami - w tym własnym synem - znaleźli dowody pozaziemskiej przyczyny wymierań kończących kredę.

### **Impakt na granicy kreda-trzeciorzęd**

Dymiący pistolet, który znaleźli, może się wydawać w pierwszej chwili nieco dziwny. Alvarez i jego współpracownicy odkryli w osadach oceanicznych, złożonych dokładnie na granicy mię-

dzy erami mezozoiczna i kenozoiczna, niewielkie ilości rzadkiego pierwiastka chemicznego - irydu. I choć jego ilość była bardzo mała, to i tak stokrotnie przekraczała wielkość stwierdzoną bezpośrednio powyżej i poniżej tej granicy.

Jak się to ma do pozaziemskiej przyczyny wymierań? Odpowiedź jest dość prosta. Iryd, podobnie jak jego lepiej znani krewniacy, złoto i platyna, jest metalem szlachetnym i trudno wchodzi w reakcje chemiczne. Jest również bardzo rzadki w skorupie ziemskiej, ponieważ łatwo stapia się z żelazem. Kiedy powstawało jądro Ziemi, większość irydu na naszej planecie została pochłonięta przez roztopione żelazo i dziś spoczywa we wnętrzu planety. Natomiast najpospolitszym typem meteorytu, przybywającym na Ziemię, są omówione w rozdziale 2 chondryty, będące fragmentami małych planetoid, które nigdy nie przeszły etapu tworzenia się planetarnej jądra. Chondryty zawierają więc cały pierwotny iryd. Koncentracja

tego pierwiastka jest w nich prawie 10 tysięcy razy większa niż w większości skorupy ziemskiej. Dzięki temu iryd stanowi bardzo czuły wskaźnik ilości materii pozaziemskiej dostarczanej na powierzchnię naszej planety. Duże meteoryty całkowicie spalają się podczas spadku, a zawarty w nich iryd ulega rozprzestrzenieniu. W dość krótkim czasie usuwany jest z atmosfery przez deszcz i opada na dno morskie, tworząc cienką warstewkę z wysoką zawartością irydu w gromadzących się tam powoli osadach. Ponieważ iryd jest stosunkowo odporny chemicznie, zapis ten nie ulega zaburzeniom nawet w geologicznej skali czasu.

Masowe wymieranie pod koniec ery mezozoicznej wyznacza granicę między kredą i trzeciorzędem, co często jest zapisywane skrótowo przez geologów jako granica K-T. To właśnie w osadach z granicy K-T z kilku różnych oddalonych od siebie miejsc Alvarez i jego współpracownicy stwierdzili wzbogacenie w iryd. Opierając się na swoich wstępnych pomiarach, wyliczyli, że takiej ilości irydu dostarczyć mogła planetoida (lub kometa) o średnicy 10 kilometrów, i wysunęli przypuszczenie, iż skutki zderzenia mogą być odpowiedzialne za wymierania na granicy K-T. Znaleźli to spadło na świat naukowy i popular-

na prasę jak grom z jasnego nieba. Po pierwsze, cóż może być bardziej spektakularnego niż rodem z powieści *science fiction* wyginięcie dinozaurów w wyniku kolizji Ziemi z planetoidą? Po drugie, choć planetoida o średnicy 10 kilometrów nie wydaje się specjalnie duża w porównaniu z Ziemią, to konsekwencje impaktu takiego obiektu są alarmujące.

Teoretycy dość dokładnie obliczyli skutki impaktu planeto-idy. Na szczęście nie obserwowano żadnych uderzających w Ziemię obiektów o rozmiarach choćby zbliżonych do 10 kilometrów; wyliczenia oparto na rezultatach eksperymentów ze znacznie mniejszymi ciałami. Uwzględniono również skutki wybuchów jądrowych. Choć mielibyśmy się znacznie lepiej bez niej, broń masowej zagłady przynosi od czasu do czasu korzyści naukowe.

Wśród prawdopodobnych przyczyn wymierań Alvarez i jego koledzy wskazali jeden z wielu przypuszczalnych skutków ogromnego impaktu: chmurę pyłu, spowijającą cały glob, powstałą w wyniku kolizji. Stwierdzili, że pył przesłonił Słońce i zahamował na kilka lat fotosyntezę, powodując wyginięcie roślin i większości ogniw łańcucha pokarmowego, zależnego od roślin jako pożywienia. Przyczynił się również do drastycznego ochłodzenia zaciemnionej powierzchni naszej planety. Lecz oprócz tego impakt spowodowałby inne, równie poważne konsekwencje. Fale uderzeniowe, wytworzone najpierw przez planeto-ide, a potem przez materiał skalny, wyrzucony w wyniku kolizji, przechodząc przez atmosferę, mogły spowodować jej gwałtowne podgrzanie i inne poważne zakłócenia. Azot i tlen, dwa najważniejsze składniki naszej atmosfery, mogłyby się



łączyć w tlenki azotu, które z kolei rozpuszczałyby się w opadach, tworząc deszcz kwasu azotowego, bardziej żrący niż wszystko, co udało się dotąd wyprodukować człowiekowi. Atmosferę podgrzana falą uderzeniową poważnie wysuszyłaby roślinność na całym świecie, czyniąc ją podatną na ogień, a nawet wznecając pożary. Edward Anders z kolegami z Uniwersytetu Chicagowskiego stwierdzili w osadach z granicy K-T dużą ilość cząsteczek sadzy, co zinterpretowali jako rezultat rozległych, przypuszczalnie globalnych, naturalnych pożarów, związanych bezpośrednio z im-

paktem. Istnieją również w osadach świadectwa działania tsu-nami - ogromnych fal oceanicznych, które mogły osiągnąć w pobliżu miejsca oceanicznego impaktu wysokość kilku kilometrów. W rzeczywistości przypuszczalne konsekwencje kolizji na granicy K-T są tak katastrofalne, że niektórzy geolodzy głośno wyrażają zdziwienie, iż tak wiele gatunków przeżyło to zdarzenie. I nic dziwnego - energia wówczas wyzwolona, oceniona została na co najmniej 10 tysięcy razy większą, niż potencjał całego światowego arsenału broni jądrowej.

Trzeba powiedzieć uczciwie, że niektórzy naukowcy wątpią w hipotezę impaktu. Lecz w miarę jak z biegiem lat gromadzi się coraz więcej dowodów, opozycja przeciw niej słabnie. Udało się nawet zidentyfikować z dużym prawdopodobieństwem krater utworzony w wyniku spadku planetoidy - znajduje się on w Chicxulub na Jukatanie w Meksyku. Dziś z trudnością rozpoznajemy w nim krater, ponieważ w ciągu 66 milionów lat, jakie upłynęły od końca kredy, został wypełniony osadami. Pomiarów geofizycznych uwidaczniają jednak wyraźny, zarys okrągłego, pogrzebanego krateru, a wiercenia na tym obszarze dostarczyły próbek całkowicie i częściowo przetopionych skał, typowych dla kraterów impaktowych. Datowanie niektórych z tych skał wskazuje, że impakt nastąpił dokładnie w epoce wielkich wymierań na granicy K-T. Zbieżność w czasie wydaje się zbyt dokładna, aby była zupełnie przypadkowa.

Dokładna średnica krateru Chicxulub nie jest znana, ponieważ nie został on odsłonięty, lecz najnowsze badania pola grawitacyjnego wewnątrz i wokół krateru sugerują, że może on mieć 300 kilometrów średnicy. Jeśli potwierdzą to przyszłe badania, byłby to rzeczywisty dowód gigantycznego impaktu ciała o średnicy znacznie większej niż 10 kilometrów, jak początkowo oceniano. Materia wyrzucona w wyniku takiego impaktu została, oczywiście, rozproszona na znacznych obszarach. Drobnitkie ziarna minerałów szokowych, posiadających wyraźne cechy skał podłoża z rejonu Chicxulub, zostały znalezione w warstwie osadów z granicy K-T, odległej o tysiące kilometrów.

Istnieją naprawdę liczne dowody, potwierdzające teorię impaktu. Być może najsilniej przemawia na jej rzecz wzbogacenie

w iryd, odkrywane obecnie na całym globie w każdym kompletnym badanym profilu obejmującym tę granicę. Bardzo trudno jest to wyjaśnić inaczej niż nagłą ogromną dostawą materiału pozaziemskiego. Niezależnie od tego, czy impakt był bezpośrednio odpowiedzialny za część lub całość udokumentowanych wymierań na granicy K-T, czy też nie, duże pozaziemskie ciało zderzyło się z Ziemią dokładnie pod koniec okresu kredowego, około 66 milionów lat temu.

## Inne czynniki wymierań

Choć teoria impaktu skupiła uwagę na wymieraniach z granicy K-T, zginęło wówczas *znacznie* mniej gatunków niż podczas wymierań, które nastąpiły w końcu paleozoiku. Paleontolodzy od dawna znali ich doniosłość, lecz zainteresowanie granicą K-T doprowadziło do ponownego zajęcia się wszelkimi wymieraniami, a tymi na granicy perm-trias w szczególności. To prawie nie do wiary, ale około 90% gatunków żyjących w morzach pod koniec permu nie dotrwało do triasu. Życie na lądach nie było wówczas tak zróżnicowane jak w końcu mezozoiku i zapis kopalny jest mniej kompletny, lecz ostatnie prace wykazały, że organizmy zamieszkujące lądy również nie oparły się zniszczeniom. W szczególności na granicy permu i triasu stwierdzono gwałtowny spadek zróżnicowania owadów, grupy, która nie ucierpiała tak mocno jak inne na granicy K-T. Chociaż pracownicy poszukiwano dowodów na impakt planetoidy w tym czasie, nie udało się ich *znaleźć*. Tak więc inne procesy musiały spowodować to wymieranie. Życie na Ziemi, jak się zdaje, jest pod pewnymi względami bardzo kruche i może zostać zniszczone różnymi sposobami.

Warto pamiętać, że wielkie masowe wymierania, takie jak na granicy K-T oraz permu i triasu, odbywają się niezależnie od ciągłego wymierania, stanowiącego normalne zjawisko ewolucji. Masowe wymieranie wyróżnia drastyczny wzrost tempa i globalny charakter. Granice geologicznej skali czasu, wyznaczone przez dawnych geologów, pokrywają się z momentami

ziemskiej historii, w których następowały wielkie i gwałtowne zmiany, obejmujące duże obszary. Rozpoznawali je oni jako ściowo: znikaly stare formy, a ich miejsce zajmowały nowe; granice stawiano pomiędzy nimi. We współczesnych, bardziej ścisłych analizach zapisu kopalnego do badań tempa pojawiania się i znikania różnych grup roślin i zwierząt stosuje się metody statystyczne. Pozwoliły one wyznaczyć, począwszy od okresu kambryjskiego, pięć lub sześć naprawdę dużych wymierań i podobną liczbę mniejszych, co pokazano na rycinie 10.1. Zgodnie z oczekiwaniami, większość z nich pokrywa się

z zakończeniem okresów geologicznych, co stanowi ilościowe potwierdzenie wcześniejszych obserwacji.

Z ryciny 10.1 wynika, że masowe wymierania są rzadkimi zdarzeniami. W rzeczywistości ogromna większość gatunków wymarłych w czasie ziemskiej historii znikła z powodu normalnych wymierań zachodzących w tle, a nie wskutek jednego z wielkich kryzysów. Narzuca się więc pytanie, czy przyczyny masowych wymierań są równie nadzwyczajne. Dla niektórych silne dowody dużego impaktu w końcu kredy stanowią wystarczające potwierdzenie, że tak właśnie jest. Dotąd jednak na żadnej innej granicy zaznaczonej wymieraniami nie występuje wzbogacenie w iryd, brak również innych przekonujących świadectw gigantycznego impaktu. Dzieje się tak pomimo tego, że na podstawie informacji o tempie spadków ciał niebieskich na Księżycu, co pokazano na rycinie 3.1, stwierdzono z całą pewnością, że w czasie długiej historii w Ziemię uderzyły inne duże ciała. Nie można jednak wykluczyć, że impakt na granicy K-T był największy i najbardziej zabójczy w czasie minionych 600-700 milionów lat.

Do kluczowych argumentów na rzecz jednej przyczyny wymierań należy dokładnie ten sam czas zniknięcia różnych organizmów. Czy rzeczywiście wszystkie gatunki, o których sądzymy, że wymarły na pewnej granicy, zginęły jednocześnie, czy może masowe wymieranie było rozciągnięte w czasie? Czy niektóre gatunki rzeczywiście nie przeżyły do momentu, który nazywamy początkiem następnej ery lub okresu? Niestety, bardzo trudno odpowiedzieć na takie pytania, szczególnie jeśli chodzi o wcześniejsze etapy historii geologicznej. Trudność wynika częściowo z niedoskonałości zapisu kopalnego, ale jest także rezultatem tego, że nie zawsze potrafimy określić dokładny wiek konkretnej skały osadowej. Niekiedy nie udaje się też stwierdzić z całkowitą pewnością, czy dana skała jest o kilka milionów lat starsza, czy o kilka milionów lat młodsza, czy może dokładnie tego samego wieku, co znaleziona na drugim krańcu świata i kryjąca inne skamieniałości. Kiedy więc paleontolodzy sądzą, że stwierdzili ostatecznie kopalne występowanie jakiegoś organizmu, zawsze pozostaje wątpliwość, czy nie żył on

szczęśliwie jeszcze dość długo w jakimś innym regionie lub środowisku, gdzie się nie zachował. O tym, że wypadki takie się zdarzały, świadczy występowanie gatunków, zwanych przez geologów łazarzowymi - są to organizmy, o których sądzą, iż kompletnie znikły ze znanego zapisu kopalnego, a które pojawiają się ponownie po długiej, liczącej czasami nawet kilka milionów lat, przerwie. W biblijnej opowieści Łazarz został cudownie wskrzeszony przez Jezusa po czterech dniach; ten czas nie robi takiego wrażenia jak odnotowany w zapisie kopalnym. Po tem jednak Łazarz zmarł naprawdę. Gatunki łazarzowe z zapisu geologicznego musiały gdzieś żyć w czasie, kiedy wydawały się nieobecne, lecz ich kryjówka nie została nigdy odnaleziona.

Pomimo trudności w zebraniu szczegółowych informacji na temat tempa masowych wymierań, dostępne dowody świadczą o tym, że wydarzenia na granicy K-T miały znacznie gwałtowniejszy przebieg niż większość innych. Tego właśnie można było oczekiwać, jeśli rzeczywiście impakt, który jest zdarzeniem naprawdę nagłym, odegrał istotną rolę w wymieraniach. A jeśli przyczyny większości masowych wymierań mają charakter bardziej globalny niż zderzenie z obiektem pozaziemskim, to być może pozwolą je wyjaśnić badania nad wymieraniami zachodzącymi ciągle w tle, czyli „normalnymi”. Znana jest pewna liczba przypadków współczesnych lub pochodzących ze stosunkowo niedawnego zapisu kopalnego, które dostarczają dość jednoznacznych informacji o ich przyczynach. Zmiana klimatu - nawet dość niewielka - może być odpowiedzialna za wymieranie. Na pustyniach południowej Kalifornii, na przykład, żyje dzisiaj w kilku oazach gatunek małej ryby. W końcu gatunek ten wymrze, pomimo ochrony ze strony człowieka. Kilka tysięcy lat temu, kiedy w regionie tym klimat był bardziej wilgotny, ryby owe licznie zamieszkiwały duże jeziora - podobnie jak Indianie Cahuilla, których życie skupiało się również wokół jezior.

Wiele dowodów pośrednich wskazuje na to, że zmiana klimatu legła u podstaw niektórych wielkich wymierań w przeszłości. Konkurencja, szczególnie przy zdobywaniu pożywienia, to inna przyczyna, choć nie wydaje się, aby odegrała

dominującą rolę w masowych wymieraniach. Stwierdzono, że konkurencja zepchnęła ssaki na podrzędną pozycję w mezo-zoiku. Choć pojawiły się i ewoluowały od początku ery, zaczęły dominować prawie 200 milionów lat później, dopiero po wyginięciu dinozaurów. Nie zamierzone ani nawet zaplanowane wprowadzenie na jakiś teren obcych gatunków powodowało często osłabienie, a niekiedy zupełny zanik, w wyniku konkurencji, rodzimych populacji roślin i zwierząt. Duże wymierania australijskich torbaczy po przybyciu na kontynent pierwszego człowieka są właśnie tego przykładem.

Lista czynników mogących powodować masowe wymierania jest dość długa. Obejmuje ona mechanizmy zarówno egzotyczne, jak i zupełnie zwykłe; należy do nich pobliski wybuch supernowej, który skapał Ziemię w zabójczym promieniowaniu, tektonika płyt, przesuwająca kontynenty do sprzyjających stref klimatycznych i poza nie, oraz zmiany poziomu morza. Być może jednym z najlepszych sposobów stwierdzenia, które z tych czynników miały znaczenie, jest szczegółowe przeanalizowanie znanych wymierań i stwierdzenie, jakie typy organizmów wymarły i czy istnieją świadectwa różnego rodzaju zmian środowiskowych w tym samym czasie.

## Prekambryjskie wymieranie?

Pierwsze masowe wymieranie uznawane przynajmniej przez niektórych paleontologów zdarzyło się w prekambrze. Jego dokładna data nie jest pewna, lecz nastąpiło ono blisko końca ery proterozoicznej. Dotknęło ono najbardziej pozbawione szkieletów organizmy ediakariańskie, o których krótko wspomnieliśmy w rozdziale 6; w tym samym czasie zniknęły najprawdopodobniej niektóre gatunki glonów. Wśród paleontologów zaistniał spór o to, gdzie w generalnym schemacie ewolucji umieścić zwierzęta ediakariańskie, a szczególnie: czy są one spokrewnione z późniejszą fauną typu fauny z łupków z Burgess? Pomijając ich związki z innymi organizmami, skamieniałości ediakariańskie występują powszechnie w skałach osadzonych

w płytkich morzach późnego prekambru i na większości dzisiejszych kontynentów. Zachowały się stosunkowo dobrze, mimo że nie posiadały zmineralizowanych szkieletów ani muszli; ich najwyraźniej nagłe zniknięcie jest zagadkowe. Przypuszcza się, że owe zwierzęta nie uległy masowemu wymieraniu, a ich nagły brak w zapisie kopalnym wynika ze zmiany warunków fosylizacji. Najczęściej przywoływaną możliwą przyczyną jest gwałtowny wzrost liczby padlinożerców, zwierząt ryjących czy bakterii utleniających; każdy z tych czynników lub wszystkie razem mogły powodować szybkie niszczenie kruchych ediakariańskich szczątków. Brak jednak przekonującego niezależnego dowodu na to, że pojawienie się tych organizmów zbiegło się rzeczywiście ze schyłkiem fauny ediakariańskiej. Co więcej, liczne późniejsze osady nie zawierające skamieniałości ediakariańskich pod innymi względami są bardzo podobne. Wynika stąd, że nie nastąpiła drastyczna zmiana środowiska sedymentacji. Tak więc zniknięcie owej dość zróżnicowanej fauny, w połączeniu z dowodami wymarcia w tym samym czasie pewnych typów glonów, sugeruje, że późny proterozoik był rzeczywiście świadkiem masowego wymierania.

Jeśli takie zdarzenie nastąpiło, co było jego przyczyną? Przebadano dokładnie osady z tego okresu w poszukiwaniu wzrostu zawartości irydu, mogącego być świadectwem impaktu, lecz nic nie znaleziono. Niezbyt liczne świadectwa przemawiają za wyjaśnieniem owego wymierania tym, że środowiska preferowane przez faunę ediakariańską - to jest środowiska płytkowodne - uległy drastycznemu ograniczeniu w wyniku spadku poziomu morza. Analiza zachowanych osadów z późnego prekambru wskazuje na to, że poziom morza podnosił się wówczas i obniżał cyklicznie. Jeden z największych spadków, nazywanych również regresjami, zbiegł się w tym czasie zapewne z wymarciem organizmów ediakariańskich.

Zmiana poziomu morza, szczególnie jego obniżenie, uważana jest powszechnie za jeden z głównych czynników wielu wymierania widocznych w zapisie geologicznym. Ponieważ efektem wietrzenia i erozji jest zrównanie *wzgórz i gór*, prowadzące do obniżenia powierzchni lądów, duże partie kontynentów cha-

rakteryzują się niewielkim wyniesieniem ponad poziom morza i prawdopodobnie było tak zawsze. W owych regionach nawet stosunkowo niewielka zmiana poziomu morza może mieć dramatyczne konsekwencje. Aktywność biologiczna jest zwykle większa w morzach płytkich i okresy, gdy poziom morza pozostaje wysoki, dostarczają dużej ilości środowisk dla morskich organizmów; kiedy jednak morza się wycofują, wiele z owych organizmów wymiera. Fluktuacje poziomu morza w ciągu minionych 600 milionów lat wydają się bardzo duże - wynoszą przynajmniej 200 metrów.

Zmiany poziomu morza wpływały, oczywiście, tylko na wymierania w środowiskach morskich. Wymierania obejmujące również dużą liczbę mieszkańców lądów (takie jak na granicy K-T) nie mogą być wyłącznie wynikiem takich zmian. Co więcej, nie zawsze wahaniom poziomu morza, nawet dużym, towarzyszyły wielkie wymierania.

### **Problemy ilościowego określenia i zrozumienia masowych wymierania**

*Geolodzy i paleontolodzy*, usiłujący zdefiniować i zrozumieć wymierania, napotykają liczne trudności warte prześledzenia, nawet pobieżnego. Bardzo łatwo można je stracić z pola widzenia, kiedy bez namysłu się mówi, że wymieranie, takie jak na granicy perm-trias, zabiło 90% gatunków morskich. Czy rzeczywiście tak było? Jak mocne są na to dowody?

Na podstawie obserwacji organizmów w dzisiejszych oceanach wiemy, że tysiące gatunków nie pozostawia zapisu kopalnego lub - w najlepszym wypadku - bardzo słaby. Dotyczy to szczególnie zwierząt bezkręgowych, na przykład robaków, które przecież są liczne i odgrywają ważną rolę w faunie morskiej. Wydaje się, że w permie jeszcze mniej morskich organizmów łatwo ulegało fosylizacji. Co więcej, tylko niewielka część tych organizmów - te, które zachowały się jako skamieniałości - została odkryta i zbadana. Na dynamicznej Ziemi skały osadowe zawierające skamieniałości mogą ulec subdukcji, zostać

zmetamorfizowane, wypiętrzone i usunięte przez erozję. Im starsza skała, tym mniej prawdopodobne, że nie dotknął jej któryś z tych procesów. Istnieją jednak miejsca, w których zachowały się osady zawierające dobry zapis kopalny życia w

permie i triasie; dokładne ich badania dostarczyły dowodów masowych wymierań. Jak już wspomniano, we współczesnych pracach stosuje się metody statystyczne. Choć stary dowcip o statystyku, który utopił się w rzece o średniej głębokości 10 centymetrów, deprecjonuje takie badania jako dostarczające czasami niepełnego obrazu, to ogromna liczba biologicznych rodzin i rodzajów, przesledzonych w badaniach nad wymieraniem, uzasadnia ekstrapolację wyników na wszystkie istniejące organizmy.

Niemniej, nawet bardzo duże bazy danych, dokumentujące, które rośliny i zwierzęta przeżyły konkretną granicę, a które wyginęły, muszą być traktowane z ostrożnością. Niefortunnym, lecz zrozumiałym aspektem badań paleontologicznych - a w istocie dotyczy to większości dyscyplin naukowych - jest specjalizacja. Paleontolodzy to przeważnie specjaliści zajmujący się skamieniałościami z jakiegoś konkretnego przedziału czasu geologicznego - z permu, triasu lub nawet z jeszcze drobniejszego odcinka skali czasu. Tak więc specjalista od permu potrafi rozpoznać grupę organizmów, których większość znika z zapisu kopalnego z końcem tego okresu. Lecz specjalista od triasu może umieścić członka tej grupy, który przeżył, w innej grupie triasowej. Jest to w pewnym sensie pseudowymarcie, przynajmniej na poziomie omawianej grupy: „znika” ona wyłącznie z powodu schematu klasyfikacyjnego, a nie naprawdę.

Jeszcze innym aspektem wymierań, do którego trzeba podchodzić krytycznie, jest kwestia przyczyny i skutku. Trudno nie wierzyć, że impakt K-T miał wpływ przynajmniej na niektóre wymierania w końcu kredy, choćby dlatego, że zdarzył się dokładnie wtedy, co niezależnie stwierdzono na podstawie skamieniałości. Lecz nie jest to jednoznaczny dowód na istnienie między tymi wydarzeniami związków przyczynowych. Problem przyczyny i skutku jest jeszcze trudniejszy w wypadku wymierania na granicy perm-trias, jak również innych wymierań, dla

których brak dowodów nagłej katastrofy. Możemy wskazywać na zmiany poziomu morza, klimatu lub jakieś inne czynniki, które pokrywają się w czasie z danym wymieraniem, lecz dopiero wykazanie, że organizmy, które wymarły, były najbardziej czułe na takie zmiany, z pewną dozą pewności potwierdzi istnienie związku przyczynowego.

## **Wielki kryzys permsko-triasowy**

Spektakularny charakter zdarzeń na granicy kredy i trzeciorzędu osłabia nieco znaczenie wymierań permsko-triasowych, w czasie których zniknęła większość gatunków żyjących wówczas w oceanach. Zniszczenia na lądzie były tylko nieco mniejsze. Charakter życia na *Ziemi* zmienił się radykalnie, a rezultaty

tej zmiany są dzisiaj widoczne w postaci współczesnych roślin i zwierząt. Przyczyny tego zdarzenia - lub zdarzeń - pozostają niejasne, lecz przyjmuje się ogólnie, że na Ziemi musiały panować surowe warunki, skoro zdołały spowodować wyniszczenie tak dużej części życia.

Obraz, który wyłania się z badań permsko-triasowych, różni się bardzo od tego z granicy K-T. Zapis z granicy permu i triasu ukazuje złożone schematy wymierania w wyniku skomplikowanych i częściowo powiązanych ze sobą zmian środowiskowych. Nie zidentyfikowano jednoznacznie winowajcy, lecz dowiedziano się wiele o mechanizmach wymierania. Niemniej związki przyczynowo-skutkowe ciągle są dość niejasne.

Granica pomiędzy permem i triasem została przez dawnych geologów zdefiniowana na podstawie wielkich zmian, jakie zaobserwowali wśród skamieniałości organizmów morskich. Gdzie występują osady oceaniczne, które reprezentują oba okresy? Pamięamy, że Pangea powstała w permie i w czasie, odpowiadającym granicy perm-trias, stanowiła zasadniczo jeden kontynent rozciągający się od bieguna do bieguna (ryc. 8.4). Nie istniał Ocean Atlantycki. Większość ciągle jeszcze zachowanych osadów morskich z tego okresu została osadzona wzdłuż krawędzi Oceanu Tetydy - wschodniego morza, które

w końcu, jak to omówiono w rozdziale 9, rozszerzyło się na zachód, oddzielając Europę od Afryki oraz Amerykę Północną i Południową. Dziś owe osady znaleźć można w niektórych częściach południowych Alp, na Bliskim Wschodzie, w Pakistanie i Indiach oraz w Chinach. Zapis kopalny w tych regionach jest skomplikowany, ponieważ pod koniec okresu permskiego najwyraźniej nastąpiło dość szybkie obniżenie się tam poziomu morza, redukując w dużym stopniu obszar szelfów kontynentalnych, na których odkładały się osady. Niemniej szczegółowe badania zachowanych sekwencji osadów oraz ich podobieństwo w przypadku różnych geograficznie miejsc pozwalają na odtworzenie przynajmniej niektórych aspektów wielkiego kryzysu permsko-triasowego.

W uproszczeniu, podczas tego wymierania organizmy morskie ucierpiały bardziej niż lądowe; gatunki morskie, żyjące w płytkich wodach, a szczególnie takie, które były zakotwiczone do podłoża, zostały szczególnie dotknięte; wymierania były zróżnicowane geograficznie. Mocne dowody świadczą o tym, że kryzys wielu typów organizmów rozpoczął się przed wymieraniem i trwał miliony lat w permie. Istnieje jednak również powszechna zgoda, że w ostatnich kilku milionach lat permu nastąpił znaczny wzrost tempa wymierania. Zależnie od punktu widzenia, kilka milionów lat jest bardzo krótkim lub bardzo długim okresem. Wydaje się jednak jasne, że wymierania permsko-triasowe trwały znacznie dłużej niż wymierania na granicy K-T.



Co mogło powodować owe selektywne, nierównomierne, lecz niszczące wymierania, którym najmniej, jak wynika z zapisu kopalnego, brakowało do zupełnego zniszczenia życia na Ziemi? Najwyraźniejsze wydają się związki z obniżeniem poziomu morza w końcu permu, co musiało ogromnie zredukować płyt-kowodne środowiska morskie. To jednak za mało, by spowodować katastrofę, nie tłumaczy bowiem, wszystkich obserwacji, szczególnie upadku organizmów zamieszkujących lądy. Stres środowiskowy musiał być znacznie większy i najwyraźniej świat na granicy permu i triasu dostarczył go. Obniżenie się poziomu morza, na przykład, nie było izolowanym zdarzeniem,

lecz częścią kilku cykli podnoszenia i obniżania poziomu mórz pod koniec okresu permskiego; cykle te musiały się spustoszenie wśród organizmów żywych w płytkich wodach wokół krawędzi kontynentu. Podczas okresów niskiego poziomu morza znikały nie tylko rozległe płytkowodne środowiska, lecz wystawiane były również na wpływy atmosferyczne ogromne ilości złożonej w osadach materii organicznej - szczątki organizmów zamieszkujących płytkie wody. Utlenianie tego materiału prowadziło do wytwarzania  $\text{CO}_2$ , który, o czym często sobie przypominamy ostatnimi czasy, jest gazem szklarniowym. Dwutlenek węgla w atmosferze zatrzymuje ciepło w pobliżu powierzchni Ziemi; w miarę wzrostu jego zawartości podnosi się globalna temperatura. Tak więc zmiany stężenia  $\text{CO}_2$  mogą znacząco wpływać na klimat.

Co więcej, na granicy perm-trias utlenianie materii organicznej na szelfach kontynentalnych nie było jedynym źródłem  $\text{CO}_2$ . Dość szczególną i stosunkowo niedawno rozpoznaną kategorią związków, występujących w osadach szelfu kontynentalnego, są tak zwane hydraty gazów. Zawierają one duże ilości gazów, takich jak  $\text{CO}_2$  i metan, będący także gazem szklarniowym. Mogą się one tworzyć i istnieć jedynie w ściśle określonych warunkach - powstają na przykład przy przeciętnie wysokich ciśnieniach, a ulegają rozpadowi przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym, panującym na powierzchni Ziemi. Duży spadek ciśnienia związany z usunięciem 50 lub 100 metrów wody z morza pokrywającego tego typu osady mógł spowodować rozkład hydratów gazów i uwolnienie gazów do atmosfery. I wreszcie istniało dodatkowe źródło gazów szklarniowych: w pobliżu granicy perm-trias *zdarzył* się jeden z największych znanych epizodów wulkanizmu kontynentalnego. Warstwa po warstwie potoki lawy i okruchy wulkaniczne pokrywały większość środkowej Syberii - owe skały tworzą dziś trapy syberyjskie. (Określenie tego i innych podobnych nagromadzeń pokryw bazaltowych jako „trapy” pochodzi od szwedzkiego słowa, oznaczającego stepy. Płasko leżące potoki lawy, szczególnie po zerodowaniu, często przypominają obszary stepowe). Wielu geologów uważa, że skutki wulkanizmu syberyj-

skiego dla środowiska musiały być poważne, choć w argumentacji różnią się zasadniczo zależnie od tego, za jak szybkie uważają wylewy lawy. W związku z globalnymi wymieraniami mogłoby pozostawać uwolnienie dużych ilości gazów wulkanicznych, takich jak  $\text{SO}_2$  i  $\text{CO}_2$ . Co interesujące, istnieją silne dowody na to, że mniej więcej w tym samym czasie, kiedy zanotowano szybkie tempo wymierania, zdarzyło się kilka innych epizodów wulkanizmu kontynentalnego na wielką skalę. Najbardziej znanym są trapy Dekanu, powstałe z nagromadzenia potoków lawowych w centralnych i zachodnich Indiach; przypominają one trapy syberyjskie. Wiek tych skał wskazuje, że powstały one mniej więcej w tym samym czasie, kiedy nastąpiły wymierania na granicy K-T. Nie wiemy, czy owe epizody erupcji lawy są faktycznie bezpośrednio związane z wymieraniami, lecz koincydencja jest intrygująca.

Choć datowanie skał magmowych związanych z takimi zdarzeniami, jak wylewy trópów Dekanu czy Syberii, jest stosunkowo proste, problemy techniczne omówione w rozdziale 6 utrudniają znacznie określenie wieku skał osadowych. Tak więc nie ma pewności co do dokładnego wieku niektórych zdarzeń związanych zapewne z wymieraniami permsko-triasowymi. Ponieważ Pangea, na przykład, rozciągała się pod koniec permu od bieguna do bieguna, istniały warunki do powstania polarnych czap lodowych; i rzeczywiście, znaleziono świadectwa zlodowaceń w permie. Nie jest jednak oczywiste, kiedy dokładnie zjawisko to osiągnęło maksimum i czy nastąpiło w związku z tym globalne ochłodzenie. Możliwe również, że duże i szybkie zmiany poziomu morza pod koniec permu były przynajmniej częściowo rezultatem przybywania i kurczenia się lodowców. Natomiast jasną jest, że po silnym spadku poziomu morza w końcu permu dość szybko nastąpiło ogólne globalne ocieplenie i znaczne podniesienie się poziomu morza.

Prawie wszystkie symulacje komputerowe reakcji światowego klimatu na globalne ocieplenie przewidują znacznie większe zróżnicowanie niż obserwowane obecnie. Można również oczekiwać bardzo dużej rozpiętości pomiędzy średnimi temperaturami lata i zimy oraz okresowo pojawiających się okresów niezwy-

kle gorących i skrajnie zimnych. Takie właśnie fluktuacje charakteryzowały przypuszczalnie ocieplenie klimatu pod koniec permu. Ogromny kontynent Pangei prawdopodobnie wzmacniał te tendencje, szczególnie w swym wnętrzu. Tak więc nie trzeba było nagłej globalnej katastrofy, takiej jak impakt planetoidy; świat w końcu permu - z erupcjami wulkanicznymi, wahaniami klimatu i gwałtownymi zmianami poziomu morza - był szczególnie nieprzyjaznym miejscem dla wielu form życia.

## **Charakter wymierań K-T**

Grupy, które przeżyły kryzys permsko-triasowy, jak zwykle po masowych wymieraniach, rozrosły się i uległy wielkiemu różnicowaniu w erze mezozoicznej. Choć w tej erze tempo wymierania wzrastało niekiedy powyżej wartości tła, następne naprawdę duże wymieranie widoczne w zapisie geologicznym wydarzyło się na granicy K-T. Jak wcześniej zauważyliśmy, wymierania na granicy kredy i trzeciorzędu przyciągnęły powszechną uwagę, ponieważ objęły dinozaury, jak również z powodu przekonujących dowodów na uderzenie w tym czasie dużego pozaziemskiego obiektu w Ziemię. I rzeczywiście, spotkania naukowe dotyczące zdarzeń na granicy K-T gromadzą niezwykle różnicowany zespół badaczy - biologów, geologów, fizyków i chemików.

W wypadku wymierań na granicy K-T zapis osadowy jest bardziej kompletny i łatwiej dostępny niż dla wymierań wcześniejszych, a połączone wysiłki naukowców z wielu dyscyplin uczyniły tę granicę zdecydowanie najlepiej zbadaną spośród związanych z wielkimi wymieraniami. Najlepszy zapis pochodzi z próbek rdzeni wiertniczych osadów z oceanów. Dostępność próbek osadów z różnych części świata, nagromadzonych z dala od wpływu kontynentów, miała duże znaczenie podczas gromadzenia informacji na temat zmian środowiska o ogólnoswiatowym charakterze, które nastąpiły na granicy K-T. Niestety, ponieważ subdukcja zniszczyła dno morskie starsze niż 200 milionów lat, w dzisiejszych oceanach brak odpowiedniego zapisu *zdarzeń* na granicy permu i triasu. Wszystkie próbki

morskie z tego okresu pochodzą z osadów złożonych na krawędziach kontynentów, obecnie wypiętrzonych i odsłoniętych, i zawierają często luki, wywołane okresami braku depozycji, wynikającymi z wahań poziomu morza.

Paleontolodzy badający drobnoziarniste osady z rdzeni głębokomorskich z łatwością identyfikują granicę K-T. Zaznacza się ona silnym spadkiem ilości kopalnego planktonu, szczególnie małych organizmów żyjących w przypowierzchniowych wodach i budujących skorupki z węglanu wapnia. Powyżej tej granicy owe zwierzęta ponownie odzyskują swoje znaczenie, lecz przeważnie są to już inne gatunki. Na wielu obszarach granicę tę można stwierdzić na podstawie obecności cienkiej warstewki iłu granicznego, zasadniczo pozbawionego skamieniałości zbudowanych z węglanu wapnia, lecz wcześniejszego pomiędzy młodszą i starszą wapienie wielkich miąższości. Udało się stwierdzić, że ten sposób rozmieszczenia planktonu ma charakter globalny, a przejście od bogatej produkcji węglanowych muszli do praktycznie zupełnego ich braku nastąpiło bardzo szybko. Dowodzi to, że przyczyna przynajmniej niektórych wymierań miała charakter globalny i była raptowna. Najsilniej ucierpiała górna, oświetlona słońcem część oceanu, gdzie żył ów plankton, ale w ogóle aktywność biologiczna w oceanach gwałtownie się obniżyła.

Na lądach, oprócz zniknięcia dinozaurów, nastąpiły również

inne zmiany. Jedną z nich była prawdopodobnie związana z wymarciem dinozaurów i dotyczyła królestwa roślin. Znaczna część świadectw pochodzi jednak nie ze skamieniałych roślin, lecz z badań pyłków i spór.

Choć cierpiący na katar sienny, mogą się z tym nie zgadzać, pyłki są ważne zarówno dla ludzi, jak i dla roślin. Wytwarzane przez rośliny nasienne, mają bardzo zróżnicowaną morfologię. Małe ziarna pyłków są roznoszone przez wiatr i zwierzęta daleko od swych źródeł. Są również dość odporne na rozkład. Gromadzą się powoli w osadach jezior lub płytkich śródlądowych morz, dając ciągły i często nadzwyczaj kompletny zapis pyłkowy roślin nasiennych z okolicznych obszarów. Zapis ten został szczegółowo zbadany w zachodniej części Ameryki Pół-

nocnej; w pobliżu granicy K-T świadczy o ogromnych zmianach w końcu kredy.

Najbardziej charakterystyczną cechą zapisu pyłkowego jest gwałtowny spadek ilości ziarn pyłku w porównaniu ze sporami dokładnie na granicy K-T. Spory pochodzą z paproci, co oznacza, że raptownie zmalała wówczas liczba roślin nasiennych, przy równoczesnym wzroście liczby paproci. Nawet dziś w regionach, gdzie rośliny nasienne z jakichś powodów zostały wyniszczone, gwałtownie rozwijają się paprocie, aby po pewnym czasie ustąpić roślinom „wyższym”. Po kryzysie K-T zapis pyłkowy we wczesnym trzeciorzędzie również pokazuje stopniowy wzrost ilości pyłków w stosunku do spór. Czas, w jakim to odrodzenie nastąpiło, nie jest dokładnie znany, lecz wydaje się, że był on dość krótki w skali geologicznej. Niektóre z kredowych roślin nasiennych nigdy się już nie pojawiły, stając się ofiarami wymierania, lecz w stosunkowo krótkim czasie ogólna zawartość pyłków w osadach osiągnęła poprzedni poziom.

Najbardziej interesujące w tym zapisie jest to, że spadek liczebności pyłków wydaje się znacznie większy na południu niż na północy. Wielu paleontologów zinterpretowało to jako świadectwo ochładzania się klimatu; gatunki północne, przystosowane do zimna, ucierpiały w mniejszym stopniu. Wymierania organizmów planktonowych w oceanach miały podobny charakter - formy tropikalne dotknięte zostały silniej niż te, które żyły w wodach klimatu umiarkowanego.

Zachodzi ścisły związek pomiędzy mikroskopijnymi ziarnami pyłków a gigantycznymi gadami: największe dinozaury były przecież roślinożerne i ich odżywianie zależało od roślin. Gwałtowny spadek ilości i różnorodności roślin nasiennych mógł bardzo utrudnić życie owym zwierzętom, podobnie jak drapieżnikom, które na nich żerowały. Wątpliwości dotyczące tego, co jest przyczyną, a co skutkiem w wymieraniach na granicy K-T, są nadal przedmiotem ostrych sporów. Czy rośliny nasienne i dinozaury padły jednocześnie ofiarą globalnego kataklizmu, takiego jak impakt planetoidy, czy może najpierw ucierpiały

rośliny, powodując przerwanie łańcucha pokarmowego? Czy impakt jest odpowiedzialny za ochłodzenie klimatu, zarówno

na lądach, jak i w morzach, czy też było ono rezultatem erupcji wulkanicznych w Indiach, a może jeszcze innego zdarzenia o zasięgu globalnym? Trudno odpowiedzieć na te pytania, lecz bogactwo szczegółowych informacji, które przynoszą obecnie badania osadów, będących zapisem zdarzeń na granicy K-T, może jeszcze dostarczyć rozstrzygających dowodów.

Warto zauważyć, że choć rozwodziliśmy się nad nagłością wymierań K-T, której wyraźne oznaki znaleziono, pewne gatunki, w tym niektóre dinozaury, mogły chylić się ku upadkowi już znacznie wcześniej. Zapis kopalny wykazuje stopniowe kurczenie się liczby przedstawicieli tych gatunków i ich zasięgu geograficznego. Choć może wydawać się to nieprawdopodobne z powodów statystycznych, wielu paleontologów zaczęło uważać, że zdarzenie z granicy K-T, przypuszczalnie impakt planetoidy, tylko dobiło wiele gatunków istniejących w świecie, znajdującym się już pod wpływem znacznego stresu biologicznego.

Jeśli gwałtowne pod względem geologicznym wydarzenie, kończące okres kredowy, rzeczywiście nastąpiło, to najprawdopodobniej był to impakt lub rozległy wulkanizm trapów dekańskich. Najnowsze dokładne datowania wykazały oczywiście, że erupcje i impakt są praktycznie jednoczesne z wymieraniami biologicznymi. Niewykluczone więc, że oba te zdarzenia odegrały ważną rolę. Niektóre z przewidywanych skutków wielkiego impaktu - chmury pyłów o globalnym zasięgu, kwaśne deszcze, gigantyczne fale oceaniczne, ogromne pożary - zostały już opisane, a świadectwa w zapisie geologicznym sugerują, że zjawiska te wystąpiły na granicy K-T.

Krater Chicxulub na Jukatanie ma dokładnie ten sam wiek, co granica K-T. Ta pogrzebana dziś struktura jest bardzo duża i świadczy o ogromnych rozmiarach obiektu - możliwe, że miał około 20 kilometrów średnicy lub więcej - który zderzył się z Ziemią. Szczególnie jednak interesujące jest to, że krater został przynajmniej częściowo wyłobiony w skałach osadowych, takich jak wapień i gipsy. -  $\text{CaCO}_3$  i  $\text{CaSO}_4$ . Silne podgrzanie tych materiałów w czasie impaktu mogło doprowadzić do ich rozkładu, uwalniając bardzo duże ilości tlenków siarki oraz

dwutlenku węgla do atmosfery. Dobrze wiadomo, że  $\text{SO}_2$  ze źródeł przemysłowych i wulkanów powoduje powstawanie w atmosferze aerozoli (drobniutkich kropelek  $\text{SO}_2$ , zawieszonych w wodzie). Odpowiednio liczne cząsteczki takich aerozoli tworzą atmosferyczną mgiełkę częściowo blokującą światło słoneczne i ochładzającą Ziemię. Mielśmy okazję obserwować to zjawisko, choć na znacznie mniejszą skalę niż na granicy K-T: niewielki, lecz możliwy do zmierzenia globalny spadek temperatury nastąpił po uwolnieniu ogromnych ilości siarki w wyniku wybuchu wulkanu Pinatubo na Filipinach w 1991 roku. Niższe

(o około  $0,5^{\circ}\text{C}$ ) temperatury były notowane globalnie przez blisko 2 lata, po czym wzrosły ponownie do poprzedniej wartości. Z obliczeń wynika, że siarka uwolniona wskutek im-paktu Chicxulub mogła spowodować spadek intensywności nasłonecznienia powierzchni Ziemi w okresie 10 lat o 10-20%. Gdyby w tym samym czasie wylewały się w ogromnych ilościach lawy trapów dekańskich, dostarczając dodatkowy  $\text{SO}_2$  do atmosfery, to zjawisko to uległoby znacznemu wzmocnieniu. Skoro impakt mógł spowodować chmurę pyłu o globalnym zasięgu, wydaje się bardzo prawdopodobne, że Ziemia częściowo pogrążona została w ciemnościach i w rezultacie znacznie się ochłodziła na co najmniej kilka lat. Co więcej,  $\text{SO}_2$  tworzy z wodą kwas siarkowy. Cząsteczki atmosferycznego aerozolu były więc kwaśne i w miarę jak opady stopniowo usuwały je z atmosfery, powstawał żrący, kwaśny deszcz. Schyłek okresu kredowego musiał być naprawdę nieprzyjemny.

Oprócz kilku wyjątków, masowe wymierania zdarzały się od kambriu w każdym okresie geologicznym. Omówiliśmy nieco dokładniej dwa z nich - największe. Dostrzegli je już dawni geolodzy dokonujący podziału czasu geologicznego na duże jednostki, ponieważ wymierania stanowią podstawę granic między paleozoikiem a mezozoikiem oraz między mezozoikiem a kenozoikiem. Omówiliśmy również, aczkolwiek nie tak szczegółowo, masowe wymieranie w końcu prekambriu, które wyniszczyło tajemniczą faunę ediakariańską. Czy coś łączy owe nagle i straszne w skutkach kryzysy życia na Ziemi? Na razie odpowiedź wydaje się, z pewnymi zastrzeżeniami, brzmieć: nie.

Z zastrzeżeniami, ponieważ podczas praktycznie wszystkich tych wymierań można obwiniać o nie zmiany klimatu, choć szczegóły zmian nie powtarzają się dokładnie w każdym wypadku. Wydaje się, że granica K-T ma charakter szczególny w tym sensie, iż wszelkie inne granice związane z masowym wymieraniem nie dostarczają niewątpliwych dowodów impaktu. Być może jednym z najbardziej interesujących zbiegów okoliczności - jeśli był to istotnie zbieg okoliczności - są epizody silnego wulkanizmu kontynentalnego, towarzyszące dwóm największym wymieraniom fanerozoicznym, jednemu na granicy kredy i trzeciorzędu, drugiemu permu i triasu. Wylewy bazaltów na kontynentach, takie jak te, z których powstały trapy syberyjskie i dekańskie, są stosunkowo rzadkie w historii geologicznej, a dwa wymienione epizody zbiegają się z dwoma największymi masowymi wymieraniami. Czy istnieje między nimi związek przyczynowy? Choć niektórzy geolodzy twierdzą, że tak właśnie jest, nie można jeszcze tego twierdzić. Nie wszystkie wylewy bazaltowe, że nie wspomnę o granicach związanych z wymieraniami, zostały wystarczająco dokładnie datowane, aby dało się przeprowadzić przekonującą analizę ich współzależności. Co więcej, choć zawsze jest możliwe, że brak nam jakiegoś nieznanego czynnika, nie wydaje się, aby efekty wulkanizmu, nawet na bardzo dużą skalę (głównie uwalnianie  $\text{CO}_2$  i  $\text{SO}_2$  do atmosfery), same w sobie były wystarczająco

niebezpieczne lub gwałtowne, aby doprowadzić do masowych globalnych wymierań.

## ROZDZIAŁ 11

### SSAKI, GÓRY I LÓD: ERA KENOZOICZNA

W porównaniu z okresami wcześniejszymi, era kenozoiczna jest bardzo krótka. Niemniej znamy ją dość dobrze, ponieważ jest to najbliższy nam odcinek historii geologicznej. Konsekwencje procesów tektoniki płyt, które miały miejsce w tym czasie, są ciągle obecne, a życie roślinne i zwierzęce, które powstało w kenozoiku, to fauna i flora naszych równin, lasów i mórz. Krótko mówiąc, świat kenozoiku jest rozpoznawalny i swojski, łatwiejszy do przyjęcia niż bardziej odległe okresy czasu geologicznego z obcymi nam stworzeniami i innym ułożeniem kontynentów i oceanów.

Wiedzę o historii kenozoiku czerpaliśmy z osadów basenów oceanicznych, które zawierają kompletny jej zapis. Całe dno oceaniczne, liczące więcej niż 200 milionów lat i młodsze, uległo subdukcji, stając się ponownie częścią płaszczy ziemskiego, lecz znaczna część, która powstała na początku ery kenozoicznej, 66 milionów lat temu, jest ciągle dostępna dla badań. I choć wiemy, że głębokie morze nie jest zupełnie spokojnym miejscem, gdzie powolny deszcz cząstek osadu opada i pozostaje nienaruszony, jak uważano kiedyś, dostarcza nam ono dość kompletnego zapisu osadowego, obejmującego całą erę. Jednym z wielkich osiągnięć nauk o Ziemi w XX. wieku było zorganizowanie i przeprowadzenie Projektu Głębokich Wiercen

Podmorskich (ang. *Deep Sea Drilling Project*, w skrócie DSDP)

-przedsięwzięcia naukowego na wielką skalę, zaplanowanego częściowo w celu odczytania tego zapisu. Dziś, ponad ćwierć wieku od chwili jego rozpoczęcia, projekt nosi inną nazwę i ma jeszcze szerszy zakres niż początkowo, lecz idea pozostała zasadniczo ta sama: chodzi o wydobycie z dna oceanu długich próbek rdzeni, które pomogą nam zrozumieć historię Ziemi. Setki geologów z całego świata ubiegają się o możliwość spędzenia dwóch miesięcy pracy na morzu na statku prowadzącym wiercenia. Pracują 24 godziny na dobę, aby przebadac, opisać i przeanalizować próbki rdzeni, w miarę ich wydobywania. Ostatecznie rdzenie te dostarczane są do jednego z trzech miejsc w Stanach Zjednoczonych; Uniwersytetu Kalifornijskiego w La Jolla, Uniwersytetu Columbia w Nowym Jorku i Tek-sarskiego Uniwersytetu A&M w College Station, gdzie podlegają dalszym badaniom i są przechowywane w stanie zamrożonym do dalszych badań. Owe „biblioteki” rdzeni to nieocenione źródło materiałów dokumentujących ziemską historię: można je niemal natychmiast wykorzystać w badaniach, kiedy pojawiają się nowe idee lub nowe metody analizy. Dobrym przykładem są zdarzenia na granicy kredy i trzeciorzędu. Jak to opowiedziano w poprzednim rozdziale, odkrycie nadmiaru irydu w warstwie osadów z tej granicy doprowadziło do sformułowania hipotezy impaktu, który wydarzył się 66 milionów lat temu. Wykazanie, że zjawisko to ma charakter globalny i nie jest jakimś lokalnym efektem geochemicznym, nie związanym z impaktem, stało się możliwe jedynie dzięki badaniom rdzeni osadów z całego świata. Znaczną część tych prac objęta była projektem głębokich wierceń podmorskich.

Niezależnie od natury zdarzeń kończących erę mezozoiczną, stanowiły one punkt zwrotny w ziemskiej historii. Radykalnie zmieniły przebieg ewolucji zarówno na lądach, jak i w morzach. I choć kenozoik obejmuje jedynie 1,5% historii Ziemi, to działanie tektoniki płyt, nawet w powolnym tempie, przeobraziło w ciągu tej ery w sposób znaczący mapę fizyczną świata. Na jej początku Ocean Tetydy, omawiany w rozdziale 9, umożliwiał cyrkulację wód morskich w kierunku wschód-

-zachód. Nie istniały jeszcze ani Himalaje, ani Alpy. Klimat był znacznie cieplejszy niż dzisiaj; kopalne dowody wskazują na panowanie warunków subtropikalnych na szerokości geograficznej arktycznego koła podbiegunowego. Ssaki, choć istniały w ciągu całej ery mezozoicznej, ciągle były drugorzędnymi graczami w świecie biologicznym. Wkrótce jednak miało się to zmienić.

Naprawdę fascynujące jest to, że dysponując tak wieloma informacjami o kenozoiku, możemy zidentyfikować przyczynę i skutek ze znacznie większą pewnością niż w wypadku wcześniejszych er. Nawet stosunkowo niewielkie zmiany położenia kontynentów spowodowane tektoniką płyt w tej erze, wywarły silny wpływ na przebieg ewolucji. Te same przemieszczenia za-



inicjowały globalne zmiany klimatu, które z kolei również wpłynęły na ewolucję biologiczną. W podręcznikach historii geologicznej wcześniejsze części skali czasu są prezentowane przez ważne *zdarzenia* fizyczne i biologiczne w oddzielnych kolumnach: powstawania gór tutaj, epizody wulkanizmu tam; w oceanach rozkwitały takie a. takie organizmy, na lądach ta grupa wymarła, a pojawiła się inna. Natomiast w kenozoiku powiązania pomiędzy światem fizycznym i biologicznym, choć nie zawsze oczywiste, są przynajmniej bardzo wyraźne, i widać również, jak wielkie miały znaczenie. Nawet zdarzenia, które wydają się mało ważne w skali globalnej - na przykład powstanie około 3 milionów lat temu Przesmyku Panamskiego, łączącego obie Ameryki, przerywającego cyrkulację oceaniczną w kierunku wschód-zachód pomiędzy Atlantykiem i Pacyfikiem - miały ogromne konsekwencje zarówno dla klimatu, jak i świata biologicznego. Choć nie wydaje się prawdopodobne, abyśmy kiedykolwiek poznali szczegóły wcześniejszej historii geologicznej równie dokładnie, jak znamy kenozoik, to jednak otrzymujemy lekcję, o której nie powinniśmy zapominać, mając do czynienia z dawnymi czasami. Stwierdzone w kenozoiku związki pomiędzy tektoniką płyt, klimatem i ewolucją biologiczną musiały być wcześniej równie silne. W tym wypadku uniformitaryzm ponownie przychodzi nam z pomocą podczas poznawania przeszłości.

## Pojawienie się ssaków

Kenozoik *nazywa się* czasami erą ssaków. Od aardwarków do słoni, od wielorybów do wombatów, a także oczywiście nas, ludzi - ssaki zdominowały życie na Ziemi. Obejmują one, z jednej strony, małe stworzenia, ważące zaledwie kilka gramów, takie jak ryjówki, a z drugiej - gigantycznego płetwa-ła błękitnego, przypuszczalnie największego zwierzęcia, jakie kiedykolwiek żyło na Ziemi. Choć się nad tym nie zastanawiamy, życie człowieka i innych ssaków jest ściśle splecione, zarówno w sensie naszej historii, jak i codziennej egzystencji. Znaczna część naszego pożywienia, również nasze ubrania, w mniejszym lub większym stopniu mają związek z udomowionymi ssakami. Postępy w medycynie zawdzięczamy eksperymentom na laboratoryjnych ssakach. A eksploracja polarnych oceanów oraz Ameryki Północnej i Syberii została zapoczątkowana w poszukiwaniu wielorybów i ssaków futerkowych, co niestety okazało się opłakane w skutkach dla stworzeń, na które polowano.

Najwcześniejsze prawdziwe ssaki, o których wiemy na podstawie skamieniałości, żyły w początkach ery mezozoicznej pod koniec okresu triasowego. Nawet wcześniej, jak już wspomnieliśmy (ryc. 9.4), istniały gady ssakokształtne. Lecz przez długi czas od ich pojawienia się - więcej niż 150 milionów lat - ssaki były małe i nie rzucające się w oczy. Zgodnie z powszechnym

poglądem drapieżne dinozaury pożerały je, a pozostałe - wygrywały we współzawodnictwie ewolucyjnym. Gdy jednak wielkie wymieranie na granicy K-T wyeliminowało dinozaury, liczba i zróżnicowanie ssaków gwałtownie wzrosły. Współczesne szczegółowe badania zapisu kopalnego wykazują, że po upływie około 10 milionów lat od granicy K-T istniało 130 rodzajów ssaków (rodzaje to grupy blisko spokrewnionych gatunków), czyli nie mniej niż kiedykolwiek później. Nietoperze, naczelnę, gryzonie, wieloryby i inni przodkowie dzisiejszych zwierząt byli już wówczas obecni. Choć od tego czasu wymarło wiele gatunków i pojawiły się nowe, ogólna liczba rodzajów pozostawała mniej więcej taka sama - około 90. Znaczy to, że początkowy

zryw ewolucji wytworzył stabilną populację ssaków, która przynajmniej co do liczby rodzajów nie uległa drastycznej zmianie. (Warto ponownie przypomnieć, że zwroty takie jak „dość szybko” powinny być zawsze traktowane z pewnym dystansem, gdy mówimy o czasie geologicznym. W tym wypadku dywersyfikacja ssaków w ciągu dziesięciu milionów lat okaże się szybka, tylko wtedy, gdy rozważać ją będziemy na tle wcześniejszej powolnej ewolucji tych zwierząt, trwającej przeszło 15 razy dłużej).

Cechą charakterystyczną ssaków jest owłosienie ciała i opieka nad młodymi. Są one również stałocieplne, co pozwoliło im przystosować się do zmieniających się warunków klimatycznych łatwiej niż na przykład zmiennocieplnym gadom. Żadną jednak z owych cech nie ulega łatwo fosylizacji, tak więc klasyfikacja ssaków kopalnych opiera się na cechach struktury kostnej, szczególnie charakterze szczęki i typach zębów. Jak się okazuje, na podstawie uzębienia można się bardzo dużo dowiedzieć na temat środowiska życia kopalnych ssaków, a szczególnie o ich diecie.

Prawie wszystkie dzisiejsze ssaki są żyworodne. Jedynym wyjątkiem jest rzadka grupa stekowców, które składają jaja. Ta szczególna grupa, obejmująca dziobaki i kolczatki, zamieszkuje tylko Australię. Niestety, zapis kopalny stekowców prawie nie istnieje, a miejsce żyjących ich przedstawicieli w ewolucji ssaków jest słabo rozpoznane. Choć są one wysoce wyspecjalizowane, posiadają wiele cech prymitywnych i stanowią przypuszczalnie osobną linię pochodzącą od pradawnych gadów ssakokształtnych. Największy sukces ewolucyjny odniosły ssaki łożyskowe, do których należą ludzie i większość dobrze znanych nam zwierząt, zarówno udomowionych, jak i dzikich: psy, koty, konie, niedźwiedzie, słonie, jelenie i wiele innych. Ssaki łożyskowe rodzą się po długim okresie ciąży, a młode (w większości wypadków) mogą stawić czoło światu w stosunkowo krótkim czasie. Torbacze, druga nieco odmienna duża grupa ssaków, rodzą się w znacznie wcześniejszym stadium rozwoju i w pierwszym okresie życia muszą być chronione w

zewewnętrznej kieszeni matki.

## Torbacze

Dzisiejsze rozprzestrzenienie torbaczy dostarcza interesującego przykładu zależności między ewolucją biologiczną i tektoniką płyt. Owe zwierzęta są najszerzej rozprzestrzenione i zróżnicowane w Australii oraz na kilku sąsiednich wyspach (najbardziej znane są kangury i koale z kontynentu) i w mniejszym stopniu w Ameryce Południowej. Przypuszczalnie z powodu kosztów biologicznych (sposobu, w jaki rodzą się młode), ssaki łożyskowe wygrywają z torbacami, gdziekolwiek dochodzi do konkurencji. Zapis kopalny pokazuje, że te dwie grupy rozdzieliły się w okresie kredowym, a torbacze przypuszczalnie powstały początkowo w Ameryce Południowej. Pod koniec kredy - na krótko przed gwałtownym wzrostem zróżnicowania ssaków łożyskowych - globalny klimat był ciepły, a kontynent antarktyczny ciągle połączony z Ameryką Południową i Australią, stanowiąc pozostałości dawnego południowego megakontynentu Gondwany (ryc. 9.1). Torbacze migrowały z Ameryki Południowej przez Antarktydę do Australii. Lecz we wczesnym kenozoiku Australia oddzieliła się od Antarktydy i przesuwiała się w kierunku północnym ku Azji. Ameryka Południowa również stała się oddzielnym kontynentem i była nim przez większość kenozoiku, oddzielona od Antarktydy Cieśniną Drake'a, podczas gdy most lądowy łączący ją z Ameryką Północną został przerwany, jak to pokazano na rycinie 11.1.

W Australii torbacze mogły się rozwijać bez większego wpływu ze strony ssaków łożyskowych. Stosunkowo szybko zajęły nisze, które w innych częściach świata zarekwirowane zostały przez łożyskowce. Torbacze, wyglądające i zachowujące się jak wilki, koty i myszy, aby wspomnieć tylko kilka, po prostu rozkwitały. Niektóre, takie jak kangury, nie mają przypominających je odpowiedników gdzie indziej, lecz zajmują pozycję ekologiczną odpowiadającą innym typom zwierząt, w tym wypadku trawożernym ssakom łożyskowym. Niestety, wiele australijskich torbaczy jest dziś zagrożonych, ponieważ człowiek wprowadził na kontynent różne ssaki łożyskowe.

Torbacze podlegały również silnemu zróżnicowaniu na izolowanym w czasie kenozoiku kontynencie południowoamerykańskim i pomimo silnej konkurencji współistniejących z nimi ssaków łożyskowych stały się tam głównymi drapieżnikami. Podobnie jak w Australii, powstało tam wiele form stanowiących odpowiedniki łożyskowców gdzie indziej - w zapisie kopalnym liczne są na przykład torbacze wilkopodobne i koto-podobne. Gdy jednak około 3 milionów lat temu Ameryka Południowa połączyła

się ponownie z Ameryką Północną poprzez lądowy Przesmyk Panamski, zwyciężyli imigranci z północy. Choć istnieją pojedyncze przykłady sukcesu torbaczy - takich jak opos, który potrafił przetrwać, a nawet rozprzestrzenił się na północ - w większości ta długo izolowana fauna ssaków Ameryki Południowej (zarówno torbaczy, jak i łożyskowców) została zdziesiątkowana przez drapieżne ssaki łożyskowe, które wtargnęły poprzez Przesmyk Panamski.

Szczegóły ewolucji ssaków w Ameryce Południowej i Australii mogłyby zapełnić kilka książek. Ilustrują one takie zagadnienia, jak paralelizm w ewolucji, wpływ konkurencji i klimatu, a szczególnie rolę, jaką odegrała tektonika płyt w rozwoju ssaków, które istnieją dzisiaj. Wynika stąd, że powolne i nieubłagane ruchy kontynentów mogą zarówno tworzyć, jak i niszczyć bariery dla migracji zwierząt, wpływając poważnie na przebieg ewolucji.

## **Trawy, klimat i konie**

Konie zajmują specjalne, niekiedy romantyczne, miejsce w ludzkiej wyobraźni. Mówiąc o nich, mamy przed oczyma dzikie mustangi amerykańskiego Zachodu, mongolskich jeźdźców pędzących po stepach Azji Środkowej, piękne araby galopujące przez zielone pola o mglistym, angielskim poranku. Konie zostały udomowione tysiące lat temu. Jak jednak wyglądała ich wcześniejsza historia? Kiedy powstały i jak przebiegała ich ewolucja? Odpowiedź na te pytania, brzmiące jak *znany nam już* dobrze refren, wymaga wyjaśnienia skomplikowanych wpływów biologicznych i fizycznych. Na szczęście zapis kopalny koni należy do najbardziej kompletnych w paleontologii, a większość przeobrażeń, jakim uległy konie od najwcześniejszych do ich dzisiejszych potomków, jest dobrze udokumentowana. Ich historia to naprawdę podręcznikowy przykład badań ewolucyjnych, o którym uczą się wszyscy studenci paleontologii. Jak jednak trafnie zauważył S. J. Gould, nawet ta klasyczna sekwencja wymaga pewnego zastrzeżenia. Rzeczywiście, możemy prześledzić „ulepszenia” w linii ewolucyjnej koni, poczynając od najwcześniejszych skamieniałości do dziś. Lecz ścieżka, którą podążymy, jest tylko jedną z wielu w labiryncie rozgałęzionych zmian ewolucyjnych - ewolucja nie musiała przebiegać właśnie tak. Inne odgałęzienia wymarły i nie ma sposobu, aby przewidzieć taki wynik.

Może nas to dziwić, lecz na początku ery kenozoicznej nie istniały prairie, jakie znamy - nie było rozległych równin z wy-

sokimi trawami kołyszącymi się łagodnie na wietrze. Roślino-

źerne dinozaury odżywiały się liśćmi drzew, krzewów i innych roślin. Trawy powstały we wczesnym kenozoiku, stanowiąc kontynuację ewolucji roślin okrytozalążkowych, lecz do połowy ery, kiedy na kontynentach zaczęły pojawiać się duże obszary trawiaste, zajmowały dość ograniczone środowiska. Istnieją różnice zdań co do przyczyn ich ekspansji, naukowcy wskazują rozmaite czynniki, począwszy od wpływu klimatu aż do możliwości, że dopiero kiedy powstały trawy charakteryzujące się ciągłym odrostem liści, zdolne były przeżyć spasanie przez zwierzęta. Lecz bez względu na przyczynę, rozprzestrzenienie się obszarów trawiastych wywarło znaczący wpływ na ewolucję koni oraz innych zwierząt spasających.

Najwcześniejsze znane skamieniałości koni pochodzą z epoki eoceńskiej i tak się różnią od dzisiejszych, że w pierwszej chwili nie dostrzeżono związków między nimi. Prakon, czyli *Eohippus*, jak go nazwano (choć jego właściwa nazwa brzmi *Hyracotherium*), został znaleziony zarówno w Europie, jak i w Ameryce Północnej. *Eohippus* był zwierzęciem drobnym, o rozmiarach małego psa i żył najwyraźniej w obszarach drzewiastych. Kopyta tych zwierząt były inne niż współczesnych koni - miały cztery zakończone kopytami palce przedniej kończyny i trzy tylnej (ryc. 11.2). *Eohippus* nie posiadał również tak wydłużonego nosa jak współczesne konie, a jego zęby świadczą o tym, że odżywiały się różnymi roślinami. Ten mały kon, choć wyłącznie roślinożerny, miał kły - pamiątkę po przodkach, mezozoicznych ssakach drapieżnych. Wydłużony pysk dzisiejszych koni jest, jak się przekonamy, bezpośrednią konsekwencją przystosowania zębów i szczęki do diety złożonej z twardych i powodujących ścieranie zębów traw.

W eocenie i oligocenie potomkowie *Eohippus* ewoluowali w dość prosty sposób, dobrze udokumentowany przez skamieniałości. Konie stawały się stopniowo coraz większe; środkowy palec stopy, który w końcu przekształcił się w kopyto współczesnych koni, wzmacniał się i był coraz lepiej widoczny, a powierzchnie rozdrabniające zębów powiększały się i zostały zaopatrzone w złożone, odporne grzbiety. Podobieństwo do

*Eohippus* jest jednak wyraźne. Dopiero w miocene, w tym samym okresie, kiedy rozprzestrzeniły się trawiaste prerie, nastąpiły nagłe zmiany, prowadzące do powstania kilku różnych linii ewolucyjnych koni, z których tylko jedna przetrwała do dziś: *Eguus*, współczesny kon. Wiele ewolucyjnych eksperymentów okazało się niewypałem.

Reklamowy slogan: „jesteś tym, co jesz”, mógłby zostać wymyślony dla koni. Kilka cech charakterystycznych dla dzisiejszych koni wiąże się z ich dietą, składającą się z traw. Spośród miocenских modyfikacji, które doprowadziły do dzisiejszych koni, najważniejsza była zmiana zębów i kształtu głowy. Trawy ścierały zęby i okazały się znacznie trudniejsze do przeżuwania i miażdżenia niż soczyste liście drzew tropikalnych, stanowiące

paszę niektórych przodków koni. Trawy zawierają krzemionkę i w stosunkowo krótkim czasie mogą stepić nawet ostrza kościarki. Miocenske konie wytworzyły więc zęby o powierzch-

niach znacznie bardziej skomplikowanych i odpornych; ich korony przynajmniej częściowo mogą odrastać, w miarę jak ulegają ścieraniu. Owe zmiany pociągnęły za sobą powiększenie czaszki i wydłużenie pyska, aby wzdłuż końskich policzków powstało miejsce dla długich rzędów zębów miażdżących. Mniej więcej w tym samym czasie nogi i stopy przodków dzisiejszych koni przystosowały się lepiej do szybkiego biegu po rozległych obszarach trawiastych. Kilka niezależnych kości stopy zlało się i usztywniło, po czym nastąpiło dalsze wzmocnienie środkowego palca, na którym spoczął cały ciężar zwierzęcia. Pierwotna stopa konia przekształciła się w pojedynczy palec zakończony kopytem, jak pokazano na rycinie 11.2.

W środkowym lub późnym miocenie wiele ówczesnych koni zaczęło, przynajmniej powierzchownie, przypominać konie współczesne. Zmiany ewolucyjne zachodzą oczywiście jeszcze dzisiaj, lecz nie miałibyśmy problemu z rozpoznaniem miocenskich koni. Sądząc z zapisu kopalnego, ich ewolucja w plejstocenie nastąpiła w Ameryce Północnej. Dzisiejszy rodzaj *Equus* rozprzestrzenił się prawie na całej Ziemi i, w sposób trudny do wy tłumaczenia, zaledwie 8-10 tysięcy lat temu konie zniknęły z Ameryki Północnej. Przyczyna tego wymierania jest nieznana. Niektórzy uważają, że powodem było przybycie człowieka na kontynent poprzez most lądowy, który połączył Alaskę i Syberię. Inni utrzymują, że jakaś choroba wyniszczyła konie. Jakakolwiek była przyczyna, pozostaje faktem, że owe pełne wdzięku zwierzęta zniknęły z równin Ameryki Północnej na tysiące lat, aż do czasu, gdy przywiezione zostały przez hiszpańskich odkrywców z Europy, porzuciły swych panów i zaczęły ponownie zasiedlać ogromne obszary trawiaste.

Z opowieści tej wynika, że wiele cech współczesnego konia - chyżość, kształt głowy, kopyta, a nawet jego rozprzestrzenienie na całym świecie - są bezpośrednio lub pośrednio związane ze sposobem odżywiania oraz ulubionym środowiskiem, jakim są tereny porośnięte trawami. Lecz w jaki sposób i dlaczego powstały obszary trawiaste? Jak wcześniej wspomniano, konkuruje ze sobą kilka teorii, choć tylko niektóre są zgodne z istniejącymi dowodami. Większość z nich przywiązuje wagę do

zmian globalnego klimatu jako ważnego, a być może najważniejszego czynnika. Z całą pewnością szybkie rozprzestrzenianie się traw nastąpiło wtedy, gdy klimat we wnętrzu kontynentów stał się chłodniejszy i bardziej suchy.

## Klimat kenozoiku

Ziemią w porównaniu z dniem dzisiejszym charakteryzowała się w końcu ery mezozoicznej łagodnym klimatem. Tak było również w kenozoiku, a we wczesnym eocenie średnie temperatury nawet wzrosły, powodując, że okres sprzed około 55 milionów lat był najcieplejszym w ciągu minionych 70 czy 80 milionów lat. Lecz wkrótce potem klimat uległ gwałtownemu ochłodzeniu. Od tego czasu Ziemia ciągle się ochładza, pomimo kilku dość długich okresów ze stosunkowo stabilnymi temperaturami. Skąd o tym wiemy? Temperatura nie podlega fosylizacji, lecz naukowcy wymyślili kilka ilościowych „paleo-termometrów” stosowanych z powodzeniem przy rekonstrukcji dawnych klimatów, szczególnie kenozoiku. W połączeniu z jakościowymi dowodami, na przykład z obserwacjami rozprzestrzenienia geograficznego pewnych zwierząt lub roślin, które służą jako wskaźniki pewnych zakresów temperatur, owe paleo-termometry dostarczyły bardzo kompletnego zapisu globalnych fluktuacji temperatury w kenozoiku.

W zasadzie wszystko, co w sposób przewidywalny reaguje na temperaturę otoczenia i może przetrwać w postaci zapisu kopalnego, nadaje się do pełnienia roli paleotermometru. Jak się okazuje, dwa najważniejsze świadectwa temperatur istniejących w kenozoiku obejmują tak różne elementy zapisu kopalnego, jak kształt liści roślin i izotopy tlenu w wapieniach.

W jaki sposób kształt liści roślin może wskazywać na temperaturę? Okazało się, że czyni to zaskakująco dobrze. O tym, że istnieje ogólna zależność między kształtem liścia a klimatem, wiedziano od początku wieku, lecz w 1978 roku Jack Wolfe ze Służby Geologicznej Stanów Zjednoczonych ustalił te zależności w sposób ilościowy. Na podstawie danych z dzisiejs-

szych lasów wschodniej Azji wykazał, że istnieje wyraźna korelacja pomiędzy średnią roczną temperaturą a kształtem liści. Szczególną cechą liści, która wydaje się najbardziej istotną, jest charakter brzegu liścia (ryc. 11.3). W obszarach tropikalnych, gdzie występują wysokie temperatury i duże opady, liście są zwykle duże i mają gładkie, proste brzegi. Mają one również często wąski, wydłużony koniuszek, ułatwiający skapywanie wody. Natomiast liście z regionów chłodniejszych są mniejsze, węższe i posiadają zazwyczaj postrzępione brzegi. W dzisiejszych lasach te cechy są specyficzne dla określonych warunków klimatycznych na całym globie, nawet jeśli flora w odmiennych miejscach wyraźnie się różni. Uzasadniona więc wydaje się ekstrapolacja owych zależności na czasy wcześniejsze, a szczegółowy zapis temperatur kenozoiku, zrekonstruowany przez paleontologów na podstawie badań skamieniałości liści, jest bez wątpienia prawdziwy.

Paleotermometr wykorzystujący izotopy tlenu jest zupełnie innym wskaźnikiem temperatury, lecz opowiada podobną historię jak kopalne liście, upewniając nas, że poprawnie oceniamy wahania klimatu w kenozoiku. Metoda ta została wymyślona przez Harolda Ureya, chemika i laureata Nagrody Nobla, wspomnianego w rozdziale 3 z powodu jego eksperymentów nad powstaniem życia, prowadzonych wraz ze Stanleyem Millerem. Jak to omówiliśmy w rozdziale 6, wszystkie izotopy jakiegoś pierwiastka wykazują te same właściwości chemiczne, lecz różnią się nieco masą. W rezultacie w reakcjach chemicznych lub procesach, takich jak ewaporacja, jeden izotop może być wyróżniany w stosunku do drugiego.

Dobrym przykładem tej zasady jest wpływ ewaporacji na izotopy tlenu w wodzie. Jak wyjaśniono wcześniej, tlen ma trzy izotopy, spośród których tlen 16 występuje zdecydowanie najliczniej, stanowiąc ponad 99% całego tlenu. Każdy tlen jednakże zawiera również małe ilości tlenu 17 i tlenu 18. Cząsteczką wody jest więc najprawdopodobniej  $H_2O$  16, lecz może być również  $H_2O$  17 lub  $H_2O$  18. Większe prawdopodobieństwo ewaporacji wykazują lżejsze cząsteczki wody, czyli zawierające tlen 16. Izotopy tlenu w wodzie ulegają frakcjonowaniu, tak że

para wodna jest lżejsza (zawiera większy procent tlenu 16), a pozostały płyn w miarę postępującej ewaporacji staje się cięższy (zawiera więcej tlenu 17 i tlenu 18).

Urey badał frakcjonowanie izotopów w reakcjach chemicznych i wiedział, że dokładne proporcje izotopów *zależą*, od temperatury, w której zachodziła reakcja. Wówczas doznał ośnienia: skoro zamieszkujące oceany organizmy budują muszle z węglanu wapnia, używając jako materiału wyjściowego rozpuszczonych składników wody morskiej, to względna zawartość izotopów tlenu w muszlach musi zależeć od temperatury wody. Implikacje tego odkrycia zapierały dech w piersi. Zasadniczo tą metodą można by odtworzyć historię temperatury wody morskiej w różnym czasie, mierząc jedynie izotopy tlenu w małych muszlach dawno wymarłych organizmów z osadów oceanicznych. Ale to nie wszystko. Ponieważ w zapisie kopalnym zachowały się zarówno stworzenia zasiedlające wody powierzchniowe, jak i dno, możliwe stało się stwierdzenie różnic temperatury między wodami powierzchniowymi i przydennymi dawnego oceanu. Co więcej, analiza równowiekowych próbek z małych i dużych szerokości geograficznych powinna pozwolić na określenie gradientów temperatury między biegunem a równikiem, co, jak się okazuje, jest ważne dla zrozumienia globalnego klimatu.

Jak to często bywa z odkryciami naukowymi, zastosowanie paleotermometru Ureya w praktyce nie było proste. Na przykład śnieg, przegradzający się w końcu w polarne czapy lodowe, składa się z wody odparowanej z oceanów - w procesie, który, jak to już zauważyliśmy, zmienia skład izotopowy pozostałej



wody morskiej. Tak więc w okresach zlodowaceń zmiany w izotopach tlenu wody morskiej wynikające z tworzenia się lodowców polarnych mogą być równie duże, jak spowodowane wahaniami temperatury... W pewnym sensie jednak jest to tylko problem interpretacji, który nie zmienia faktu, że wahania zawartości izotopów tlenu występowały i są na stałe zapisane w muszlach kopalnych organizmów. Nawet jeśli nie potrafimy dokładnie określić temperatury, to moment zmiany może być wyznaczony bardzo precyzyjnie. Dziś analiza izotopów tlenu na

stałe zadomowiła się w badaniach jako jeden z najważniejszych sposobów uzyskiwania wiedzy o dawnych klimatach.

Zmiany temperatury w kenozoiku wywnioskowane z badań izotopów tlenu pokazano na rycinie 11.4. Dane uzyskane na podstawie kształtu liści bardzo dobrze potwierdzają ten zapis, szczególnie w wypadku wysokich temperatur wczesnego eocenu i niezwykle ostrego spadku temperatur na granicy eocen--oligocen. Ten ostatni zbiega się z rozpoczęciem zlodowacenia Antarktydy, czyli rozwojem polarnej czapy lodowej. Globalne oziębianie się w czasie eocenu zostało udokumentowane szcze-

gółowo w zachodniej części Ameryki Północnej na podstawie badań kopalnych liści. Wiemy, że nie tylko obniżyły się średnie temperatury, lecz również wzrosły różnice temperatur pomiędzy porami roku, a klimat stał się bardziej suchy. Skurczyły się obszary leśne, a rozpowszechniły trawiaste. W tym samym czasie ewoluowały konie i inne zwierzęta trawożerne.

Choć wiele czynników wpływa na klimat, wydaje się, że dwa największe nagłe wahnięcia temperatury w czasie kenozoiku, związane z jej spadkiem, nastąpiły przynajmniej częściowo za sprawą tektoniki płyt, która zmieniła cyrkulację oceaniczną. Pod koniec mezozoiku i na początku kenozoiku te same połączenia lądowe pomiędzy Australią, Antarktydą i Ameryką Południową, które pozwoliły torbacząkom skolonizować Australię, zapobiegały również wokółpolarnemu przepływowi wód dookoła kontynentu antarktycznego. Zimne wody płynęły na północ do Oceanu Indyjskiego, Pacyfiku i Oceanu Atlantyckiego, gdzie mieszały się z tropikalnymi, a powrotny przepływ ciepłych wód na południe podnosił średnie temperatury w regionie polarnym i nie pozwalał na rozwój lodowca (ryc. 11.1). Gdy jednak w kenozoiku Australia, a w końcu i Ameryka Południowa, oddzieliły się od kontynentu antarktycznego, zimne wody polarne mogły przepływać wokół kontynentu, jak się to dzieje dzisiaj, izolując go od cieplejszych mas wodnych (ryc. 11.5). Antarktyda się ochłodziła i rozwinęła się stała czapa lodowa, która również wpływała na ochłodzenie globalnego klimatu. Początek zlodowacenia na Antarktydzie, jak wywnioskowano z innych

dowodów, zbiega się dość dokładnie w czasie z ostrym spadkiem temperatury wody morskiej w pobliżu granicy eocen-oligocen (pokazanym na rycinie 11.4), wynikającym z badań zawartości izotopów tlenu.

Drugi nagły spadek temperatury, uwidoczniiony na rycinie 11.4 nastąpił trzy do czterech milionów lat temu, gdy inna zmiana, spowodowana tektoniką płyt, wpłynęła na cyrkulację oceaniczną. To właśnie wtedy powstał Przesmyk Panamski i zamknięta została cieśnina między Ameryką Południową i Północną, blokując dotychczasowy przepływ równikowych wód Atlantyku na zachód, do Pacyfiku. Silniejszy Prąd Zatoko-

wy niósł wzdłuż wschodniego wybrzeża Ameryki Północnej stosunkowo ciepłe wody ku północy. W chłodnym już klimacie ten ciepły prąd dostarczał ogromnych ilości wilgoci, powodując opady w regionach północnych, co dość szybko doprowadziło do powstania czapy lodowej na biegunie północnym, powodującej ponownie obniżenie temperatury w innych częściach globu. Podobnie jak ostry spadek w eocenie, również ta zmiana temperatury miała widoczny wpływ na świat biologiczny. Z kenozoicznego zapisu geologicznego wyraźnie wynika, że klimat, tektonika płyt i ewolucja są nierozdzielnie ze sobą powiązane.

## Góry w Europie i Azji

Kilku znanych mi osobiście geologów uprawia wspinaczkę wysokogorską, lecz wielu ludzi, którzy spędzają w ten sposób czas wolny, nie zdaje sobie przypuszczalnie sprawy z tego, że tę przyjemność zawdzięczają tektonice płyt. Mount Everest i Mat-

terhorn, aby wspomnieć tylko dwa szczyty popularne wśród wspinaczy, powstały dzięki rozpadowi Gondwany i powolnemu ruchowi ku północy fragmentów kontynentalnych, zakończonemu kolizją z położonymi tam masami lądowymi. Zdarzyło się to w kenozoiku. Era kenozoiczna może być równie dobrze nazywana wiekiem gór, jak i wiekiem ssaków. W czasie jej stosunkowo krótkiego trwania powstało zaskakująco wiele gór.

Rzut oka na rzeźbę powierzchni świata pozwala zauważyć istnienie pasma gór rozciągającego się od Hiszpanii i Afryki Północnej poprzez Europę i Bliski Wschód do Indii i Chin, a nawet Indonezji. Szkicowo pas ten został pokazany na rycinie 11.6. Choć poszczególne łańcuchy tego ogromnego regionu górskiego noszą różne nazwy - Pireneje, Alpy, Kaukaz, Pamir, Himalaje itd. - wszystkie one powstały w

wyniku zderzenia kontynentów dawnej Gondwany z Europą i Azją.

W kredzie, pod koniec ery mezozoicznej, Ocean Tetydy znajdował się na południe od Europy i Azji. Wzdłuż jego krawędzi rozciągały się ciepłe, płytkie i kipiące życiem wody; nagromadzone tam osady zawierały wiele substancji organicznych i dziś są źródłem znacznej części światowych zasobów ropy. Lecz dni Tetydy były policzone. W reakcji na spreading dna morskiego w Atlantyku oraz w oceanach południowych wokół Antarktydy, Afryka przesunęła się na północ w kierunku Europy. Można powiedzieć, że Alpy oraz związane z nimi góry w Europie, Afryce Północnej i wschodniej części regionu śródziemnomorskiego powstały w wyniku zderzenia pomiędzy blokiem afrykańskim i Eurazją. Przyroda jednak rzadko działa tak prosto i akuratnie, a powstanie Alp nie jest tutaj wyjątkiem. Nawet geolodzy, którzy badali te góry przez całe życie, głowią się nad niektórymi aspektami ich geologii. Niemniej spoglądając na nie z oddali i używając grubej kreski, można zrozumieć ogólne jej zarysy.

Tetyda w regionie na południe od Europy nigdy nie była szerokim morzem. Jak opisano w rozdziale 9, powstała ona podczas mezozoiku w wyniku stopniowego *rozszerzania* się ryftu, rozbijającego Pangeę od wschodu. Obok głównej płyty afrykańskiej w Oceanie Tetydy, pomiędzy Afryką i Europą istniało kilka mikropląt, będących małymi fragmentami kontynentalnymi - pozostałościami procesu, który rozdzielił te dwie masy kontynentalne. Początkowe etapy tworzenia się Alp zachodziły we wczesnej erze kenozoicznej, gdy owe mikroplaty zderzały się z Europą, ulegając ścisnaniu i nasuwaniu na północny kontynent, podobnie jak się działo z fragmentami leżącymi pomiędzy nimi dna morskiego i osadów szelfu kontynentalnego. Dwa z tych mikrokontynentów stanowią regiony znane nam dzisiaj jako Włochy i Hiszpania.

Tworzenie się tego alpejskiego pasa trwało nadal, gdy płyta afrykańska nieubłaganie zaczęła naciskać w kierunku północnym na Eurazję, powodując zamknięcie Oceanu Tetydy. Mniej więcej w tym samym czasie w wyniku spreadingu dna morskiego otwierały się północne części Oceanu Atlantyckiego; między płytami afrykańską i europejską zachodziły również

ruchy na linii wschód-zachód, powodując ich rotację i ścieranie obu płyt oraz krawędzi kontynentów. Znacznie komplikowało to zadanie geologów, usiłujących rozwikłać historię powstałych w rezultacie łańcuchów górskich.

Zderzenia między kontynentami zachodzą w ciągu długich,

nawet w skali geologicznej, okresów. Dzieje się tak częściowo z powodu powolnego ruchu płyt, lecz również dlatego, że krańce kontynentów są zwykle nieregularne; nawet jeśli są proste, to jest mało prawdopodobne, aby ustawiły się równoległe do siebie w czasie kolizji. Zderzenie, w wyniku którego utworzyły się Alpy i inne podobne góry w Europie, Afryce Północnej i wschodniej części Morza Śródziemnego, nie jest tu wyjątkiem. Proces trwał przez większość kenozoiku i zatrzymał się blisko 10 milionów lat temu. Było to złożone i wielopostaciowe zdarzenie, lecz z powodu swego młodego wieku góry te umożliwiają wgląd w procesy, jakie musiały występować w czasie podobnych zderzeń, które stworzyły starsze, dziś w większości zerodowane łańcuchy, takie jak Appalachy we wschodniej części Stanów Zjednoczonych.

Jeden z najbardziej spektakularnych aspektów geologii Alp, przynajmniej dla naukowców, to tak zwane płaszczowiny. Owe struktury są niemyym świadkiem potężnych sił ściskających, występujących w momencie zderzenia się płyt. Aby zdać sobie sprawę, czym jest płaszczowina, nie oglądając jej, wystarczy wyobrazić sobie, że podnosimy środek prostokątnego dywanu tak, że jego część zwiisa pionowo złożona we dwoje, podczas gdy reszta spoczywa płasko na podłodze; następnie puszczamy go, lekko popychając w jedną lub drugą stronę, tak aby większość dywanu uległa pofałdowaniu. Płaszczowiny są takimi właśnie ogromnymi fałdami w skałach, spoczywającymi dziś mniej lub bardziej poziomo, o długości wielokrotnie przekraczającej grubość. Owe gigantyczne fałdy są często na odcinkach dziesiątków kilometrów nasunięte na formacje skalne zupełnie innego pochodzenia. W dawnych pasmach gór kolizyjnych, gdzie z powodu erozji i metaformizmu zachowały się jedynie małe fragmenty, ich stosunek do otaczających skał może być bardzo złożony. Nawet w Alpach płaszczowiny są często zniszczone przez

erozję, lecz zwykle można prześledzić je od jednego szczytu do drugiego ponad wyerodowanymi dolinami.

W obszarze śródziemnomorskim ciągle zachodzi subdukcja, będąca rezultatem przesuwania się Afryki w kierunku północnym i popychania płyty eurazjatyckiej przez płytę afrykańską. Część dna Morza Śródziemnego podsuwa się pod Europę. Wyraźnie wskazuje na to łuk wysp wulkanicznych ponad strefą subdukcji. Aktywne wulkany u północnych wybrzeży Sycylii, takie jak Stromboli i Yulcano, a także na greckich wyspach w południowej części Morza Egejskiego, *zawdzięczają* istnienie tym samym procesom, które tworzą wulkany Aleutów, Indonezji i Andów: woda uwieczona w skałach ulegających subdukcji jest wciągana do wnętrza Ziemi i obniża punkt topnienia rozgrzanego już płaszcza, inicjując jego topienie.

Jeśli płyta afrykańska będzie nadal przesuwała się ku północy, to Morze Śródziemne czeka w końcu los Oceanu Tetydy - ostatecznie przestanie ono istnieć, a Afryka i Europa się połączą.

Tak naprawdę w czasie realizacji Projektu Głębokich Wierceń Podmorskich uzyskaliśmy dowody, pochodzące z rdzeni wiertniczych, świadczące o tym, że już w przeszłości zdarzały się okresy, gdy Morze Śródziemne przestawało istnieć, choć nie z powodu połączenia się Europy i Afryki. Na jego dnie, pogrzebane pod normalnymi osadami, występują osady soli ogromnych miąższości, miejscami przekraczające kilometr grubości. Ich wiek określono na 6 milionów lat; najwyraźniej Cieśnina Gibraltarska była w tym czasie czasowo zamknięta, zapobiegając wymianie wód z Atlantykiem, a Morze Śródziemne po prostu wyparowało, pozostawiając po sobie jedynie warstwy soli.

Ponieważ znany jest dobrze skład wody morskiej, prostą rzeczą jest wyliczenie, jak wiele soli powinno powstać, gdyby Morze Śródziemne wyschło. Obserwowane miąższości są jednak znacznie większe, niż mogłyby utworzyć się w pojedynczym epizodzie ewaporacji. Wydaje się, że bariera zapobiegająca dopływowi wody z Atlantyku była wadła i okresowo mogła być przełamywana (powstawały wtedy przypuszczalnie spektakularne wodospady wód atlantyckich, przelewających się do

Morza Śródziemnego), a grube osady soli są rezultatem wielu cykli wypełniania i odparowania.

Daleko na wschód od Morza Śródziemnego i Alp znajdujemy inne godne uwagi zjawisko topograficzne na Ziemi: Wyżyna Tybetańska i Himalaje. Region ten jest największym i najwyższym położonym obszarem wyżynnym na całej planecie, będąc jednocześnie miejscem zamieszkania yeti i (w lepszych czasach) Dalajlamy. Wyżyna Tybetańska i Himalaje to także wynik rozpadu Gondwany i kolizji kontynentów, w tym wypadku - zderzenia między Indiami i Azją.

Jak wynika z ryciny 5.2, Indie są częścią tej samej płyty litosfery, która niesie kontynent australijski. W czasie rozpadu Gondwany oddzieliły się one jednak od Antarktydy znacznie wcześniej niż Australia. Indie na przykład odsunęły się już daleko od Antarktydy, zanim torbacze przybyły tam z Ameryki Południowej; nie znaleziono tam ich skamieniałości. Przez dziesiątki milionów lat Indie w sposób dosłowny pędziły (w czasie geologicznym, oczywiście) na północ ku Azji z prędkością ponad 10 centymetrów rocznie. Mechanizm tektoniki płyt wymaga, aby leżące między nimi dno morskie ulegało subdukcji. I rzeczywiście, istnieją w skałach Himalajów takie dowody. Znaleziono tam zmetamorfizowane, lecz rozpoznawalne szczątki łuków wulkanicznych świadczące o istnieniu strefy subdukcji wzdłuż południowej krawędzi Azji.

Około 55 milionów lat temu - dokładny czas jest przedmiotem sporów - rozpoczęła się wielka kolizja. Dużo wcześniej małe fragmenty skorupy - egzotyczne terrany - zmiotane były na Azję przez dno morskie, ulegające subdukcji. Stanowią one dziś część Wyżyny Tybetańskiej. Lecz pierwszy kontakt z Indiami

nałapał, jak się wydaje, w miejscu, które dziś stanowi ich północno-zachodni cypel. Kontynent zaczął się wówczas powoli obracać przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara, zamykając pozostały fragment Oceanu Tetydy niczym gigantyczna szczeka. Małe części dna morskiego, które oparły się subdukcji, były wówczas nasuwane na ląd i dziś można je znaleźć w Tybecie. Niektóre z najwyższych szczytów Himalajów są częściowo zbudowane z osadów oceanicznych pochodzą-

cych z krawędzi Oceanu Tetydy, zdartych i nasuniętych na Azję w czasie kolizji.

Choć chronologię *zderzenia* można w pewnym stopniu określić dzięki datowaniu skał z Himalajów metodą rozpadu promieniotwórczego, jak opisano to w rozdziale 6, to nie zawsze możliwe jest stwierdzenie, czy owe skały powstały podczas zderzenia, czy ich wiek jest odbiciem wcześniejszych zdarzeń lub też zegar geologiczny został przestawiony w wyniku metamorfizmu. Na szczęście istnieją dodatkowe wskazówki na temat czasu kolizji. Ponieważ od późnego mezozoiku, jeszcze przed początkiem wieku ssaków, Indie stanowiły izolowany kontynent-wyspę, to przybycie tam różnych kontynentalnych grup ssaków, które ewoluowały w Azji, stanowi zdarzenie wyraźnie widoczne w zapisie kopalnym Indii. Stało się to około 45 milionów lat temu, co świadczy o tym, że powstała już wówczas lądowa droga migracji między Azją a Indiami.

Chociaż zderzenie Indii z Azją rozpoczęło się ponad 50 milionów lat temu, wypiętrzenie prowadzące do powstania dzisiejszych Himalajów nastąpiło *znacznie* później. Kolizje kontynentalne, jak już wspomniano, są długotrwałe i wiele czasu dzieli początek rotacji Indii w kierunku północno-wschodnim, powodującej zamykanie morza wzdłuż ich całej północnej krawędzi, od ostatecznego połączenia się kontynentów. Pierwszej wskazówki, że rozpoczęło się tworzenie dużych grzbietów górskich, dostarczają osady złożone w Morzu Arabskim, Zatoce Bengal-skiej i na kontynencie indyjskim. Góry wytwarzają bardzo charakterystyczne osady. Niezależnie od występującego tam typu skał, strome górskie zbocza i szybki przepływ wody powodują, że pochodzące z nich okruchy są zwykle gruboziarniste. Takie właśnie osady pojawiają się po raz pierwszy w oceanie u ujść Gangesu i Indusu - głównych rzek spływających z Himalajów -około połowy miocenu, w przybliżeniu 20 milionów lat temu. Mniej więcej w tym samym czasie podobne osady zgromadziły się w płytkich morzach, które pokrywały wówczas część kontynentu indyjskiego.

Tempo, w jakim Indie posuwały się na północ, spadło gwałtownie, kiedy zaczęły się one zderzać z Azją, lecz kompresja

między obydwojma kontynentami przebiega do dziś. Siły wy-

stepujące w takich zderzeniach są prawie niewyobrażalne. Skorupa Indii, zbudowana ze skał kontynentalnych małej gęstości, nie może ulec głębokiej subdukcji do płaszcza. - jest ona zbyt pławna. Lecz w miarę tego, jak zgniatała ją Azja, podążała za poprzedzającym ją dnem morskim w dół do strefy subdukcji, tak że jej część wcisnęła się pod Azję, wytwarzając skorupę kontynentalną prawie dwukrotnie grubszą niż gdziekolwiek na świecie. Ogromne naciski, towarzyszące temu procesowi, w sposób nieunikniony powodowały spekanie skorupy. Himalaje wypiętrzały się w ciągu ostatnich kilku milionów lat głównie wtedy, gdy odłamki skorupy, nie mając się gdzie podziąć, były wyciskane ku górze wzdłuż stromo nachylonych uskoków, podczas gdy Indie nieustannie naciskały w kierunku północnym na Azję. Proces ten przebiega okresowo, a nie ciągle, z nagłymi skokami. - i bardzo dużymi trzęsieniami ziemi - występującymi, gdy naciski w strefie pęknięcia stają się zbyt duże i dwa przyległe bloki skalne ślizgają się jeden po drugim.

Niszczące trzęsienia ziemi, związane ze zderzeniem Indii z Azją, nie występują wyłącznie w bezpośrednim sąsiedztwie Himalajów. W miarę jak Indie posuwały się na północ, skorupa ulegała pogrubieniu, a jej części wciskały się pod skorupę azjatycką, podczas gdy inne nasuwały wzdłuż uskoku ku górze. Lecz nie było to jedyne przystosowanie się do tego ruchu. Dodatkowo, niektóre części Azji były ściskane i obracane w kierunku wschodnim, ustępując przed napierającym ciągle kontynentem indyjskim. Większość tych ruchów następowała przeważnie wzdłuż uskoków o przebiegu wschód-zachód i ciągle tak się dzieje, ponieważ Indie nadal przesuwały się na północ. Konsekwencje tego ruchu są widoczne nawet w odległości tysięcy kilometrów. Trzęsienia ziemi odpowiedzialne za śmierć tysięcy ludzi w Chinach występują wzdłuż uskoków związanych z tą kolizją. A Bajkał w północnej Syberii, największe słodkowodne jezioro na świecie, zajmuje ryft w skorupie, który najprawdopodobniej powstał w momencie, gdy Azja uległa ściśnięciu i obróciła się, usuwając się z drogi Indiom.

Nim pozostawimy temat tworzenia się gór w kenozoiku, warto krótko wspomnieć o wpływie tych zdarzeń na światowy klimat. Widzieliśmy już, że ruchy kontynentów powodują zmiany cyrkulacji oceanicznej, jak to się stało w momencie rozpadu Gondwany, gdy prąd wokółantarktyczny izolował Antarktydę i spowodował rozwój stałej pokrywy lodowej. Góry natomiast wpływają na cyrkulację atmosferyczną. Czasami działają one jak proste bariery w stosunku do powierzchniowych wiatrów, i mogą silnie zmieniać rozkład opadów. Tak właśnie dzieje się wzdłuż zachodnich wybrzeży Ameryki Północnej, gdzie wilgotne powietrze pacyficzne wznosi się wzdłuż grzbietów, takich jak Sierra Nevada w Kalifornii, tracąc większość wilgoci. W rezultacie niezbyt daleko na wschód od obszarów narciarskich, gdzie częste są zimowe opady śniegu, osiagające trzy do czte-

rech lub więcej metrów grubości, leży sucha pustynia Doliny Śmierci. Himalaje i Wyżyna Tybetańska jeszcze bardziej wpływają na klimat, ponieważ odgrywają ogromną rolę w monsunach, stanowiących część systemu cyrkulacji atmosferycznej na całym globie. W miarę jak zbliża się lato, słońce rozgrzewa wysoką Wyżynę Tybetańską oraz powietrze ponad nią, inicjując kierunek cyrkulacji, która z południa i zachodu ściąga wilgotne powietrze tropikalne, a wraz z nim oczekiwane opady, nad subkontynent indyjski. Dokładne badania zapisu kopalnego z tego rejonu pokazały, że silne sezonowe monsuny, charakteryzujące obecny klimat tego obszaru, pojawiły się dopiero po wypiętrzeniu Himalajów i Wyżyny Tybetańskiej.

## Ochładzająca się Ziemia

Na podstawie różnych wskaźników klimatu, takich jak typ krawędzi liści i izotopy tlenu, stwierdziliśmy już, że temperatura na Ziemi spadała od początku eocenu (ryc. 11.4). W końcu, w regionach położonych na dużych szerokościach geograficznych stało się na tyle chłodno, że śnieg utrzymywał się przez cały rok, a Ziemia wkroczyła w nową epokę lodową. Okresy takie występowały co jakiś czas w historii Ziemi, lecz dość rzad-

ko. Pozostawiają one wyraźny zapis w skałach w formie żwirowych osadów zdartych przez lód i osadzonych wzdłuż krawędzi lodowców lub jako roczne warwy, opisane w rozdziale 4, albo jako rysy i bruzdy pozostawione na skalnym podłożu przez przesuwany się lód. Kenozoiczny epizod glacialny nazywany jest czasami plejstocenską epoką lodową, ponieważ w plejstocenie pojawiło się wiele wyraźnych śladów wielkich pokryw lodowych, pokrywających okresowo część Europy i Ameryki Północnej. W rzeczywistości jednak jest to myląca nazwa. Zapis skalny dowodzi, że stała czapa lodowa Antarktydy istniała już około 35 milionów lat temu, a stałe lodowce na północy były obecne przed prawie 3 milionami lat, a więc znacznie wcześniej, niż rozpoczął się plejstocen.

Zlodowacenie kenozoiczne przekształciło krajobraz większości obszarów półkuli północnej. Pozostawiło również jedno z najbardziej wartościowych zasobów geologicznych, jakimi są złoża piasku i żwiru. Zlodowacenie to spowodowało też powstanie niektórych malowniczych krajobrazów oraz tysiąca jezior, którymi upstrzone są północne regiony Rosji, Europy, Kanady i Stanów Zjednoczonych. Przebieg ewolucji - w szczególności ewolucja człowieka - odbywał się w kenozoiku pod silnym wpływem pojawiających się i zanikających lodowców. A chociaż dziś żyjemy w interglacjale - chwilowym okresie ciepłym - nie ma powodu podejrzewać, że obecny epizod glacialny się



zakończył. Piętnaście tysięcy lat temu obszary, na których dziś znajduje się wiele miast europejskich i północnoamerykańskich, były pogrzebane pod lodem ogromnej miąższości i w przyszłości rozprzestrzeniające się lądolody mogą je pokryć ponownie. W następnym rozdziale zakończymy naszą podróż przez czas geologiczny, zapoznając się ze współczesnymi poglądami na temat zlodowaceń, zmian klimatycznych oraz historii i skutków zlodowacenia „plejstocenskigo”.

## ROZDZIAŁ 12

### WIELKA EPOKA LODOWA

Mieszkańcy Bombaju czy Rijadu mogą się z tym nie zgodzić, lecz Ziemia znajduje się obecnie w okresie epizodu glacialnego. To prawda, że obecnie jest stosunkowo ciepło, mamy tak zwany interglacjał, lecz w ciągu ostatnich kilku milionów lat nasza planeta była chłodniejsza niż przeciętnie w swojej historii. Istnieją dzisiaj czapy lodowe kontynentalnych rozmiarów zarówno na północnej, jak i na południowej półkuli. Zaledwie 300 kilometrów od równika, na górze Kilimandzaro, znajduje się stały lodowiec pięciokilometrowej szerokości. Przyczyny periodycznych okresów głębokiego zamrożenia obejmującego Ziemię są dość złożone i pomimo dziesiątków lat badań niezbyt dobrze zrozumiane. Lecz szczegóły ostatniej epoki lodowej, tej, w której ciągle się znajdujemy, stają się *coraz* lepiej udokumentowane. Wahania objętości lodu i poziomu morza, reakcja roślinności lądowej na zmiany klimatu, a nawet *rzeczywiste* wahania temperatury zachodzące w ciągu minionych kilku milionów lat są dość dobrze poznane. Historia wyłaniająca się z tych informacji jest szczególnie fascynująca, ponieważ ewolucja człowieka nastąpiła właśnie w tym okresie i pozosta-

wała pod silnym wpływem klimatu. Zapis kopalny dowodzi, że lokalny, a nawet globalny reżim klimatyczny ulegał czasami szybkim zmianom w czasie, który wydaje się krótki nawet

z punktu widzenia człowieka. Wynika z tego, że małe zmiany czynników, które same nie wydają się istotne, mogą, w połączeniu z innymi oraz w wyniku sprzężenia zwrotnego, dawać znaczące odchylenia klimatyczne. Wiele owych nagłych odchyień miało dobrze udokumentowany wpływ na rozwój cywilizacji ludzkiej. Pomijając nawet zmiany klimatyczne spowodowane przez człowieka, powinniśmy być przygotowani na duże wahania klimatu w przyszłości. Zgodnie ze znanym powiedzonkiem, dotyczącym przewidywań kursów na giełdzie, przypisywanym sławnemu amerykańskiemu bankierowi: klimat z dużym prawdopodobieństwem będzie podlegał fluktuacjom.

## **Rozpoznawanie epok lodowych**

Warto chyba pospekulować, czy zlodowacenia w skali kontynentalnej zostałyby rozpoznane w zapisie skalnym, gdyby nie fakt, że Ziemię pokrywają dzisiaj liczne lodowce. Na początku XIX wieku kilku europejskich naukowców zdało sobie sprawę, że lodowce badane przez nich w Alpach i innych miejscach musiały mieć znacznie większe rozmiary w przeszłości. Doszli oni do takiego wniosku po stwierdzeniu, że na obszarach bardzo oddalonych od dzisiejszych lodowców występują osady podobne do znajdujących przy ich krawędziach. W 1795 roku szkocki geolog, James Hutton, który pierwszy sformułował zasadę uniformitaryzmu, spekulował w swojej publikacji, że dziwne „narrzutowe” głazy w pobliżu Genewy musiały zostać przyniesione do miejsca dzisiejszego ich występowania i złożone tam przez lodowce. Najbliższe lodowce, jak napisał, znajdowały się dziesiątki kilometrów od owych głazów. (Choć Hutton o tym nie wiedział, głazy te przybyły z jeszcze odleglejszych obszarów). Lecz człowiekiem, którego nazwisko najczęściej wiąże się z koncepcją zlodowacenia w skali kontynentalnej, był Louis Agassiz, szwajcarski geolog, który zebrał informacje na temat osadów glacialnych z całej Europy, a w końcu także z Ameryki

Północnej. Początkowo sceptyczny, Agassiz dał się przekonać dowodom, że znaczna część północnej Europy była w przeszło-

ści pogrzebana pod grubą pokrywą lodową. Bardzo niewielu współczesnych mu badaczy zgadzało się z tym poglądem. Kilku uznanych naukowców tamtego czasu dawało przyjacielską radę młodemu, zblakaniem naukowcowi, sugerując, aby powrócić do badań nad rybami kopalnymi, które zapewniły mu reputację znakomitego paleontologa, zanim zajął się lodowcami. Lecz nie powstrzymało to Agassiza. On i jego asystenci wspinali się na niezdołane góry, aby lepiej obserwować lodowce, mierzyli tempo ich przepływu i badali moreny (nagromadzenia żwiru i głazów) przy ich krawędziach. Zebrane dowody były tak jednoznaczne, że w końcu Agassiz przekonał nawet największych sceptyków. W 1848 roku przeniósł się do Stanów Zjednoczonych, aby zostać wykładowcą na Uniwersytecie Harvarda i podczas podróży po północno-wschodnich rejonach swej nowej ojczyzny stwierdził liczne ślady działalności glacialnej, co wywołało jego zachwyt. Był on charyzmatycznym mówcą i oddanym nauczycielem, wymagającym od studentów nie tylko wiedzy książkowej, lecz również obserwacji natury; i choć kontynuował badania paleontologiczne, to właśnie jego popularne wykłady na temat lodolodów przyciągały powszechną uwagę. W uznaniu jego wkładu w tę dziedzinę geologii, ogromne jezioro lodowcowe, które około 12 tysięcy lat temu utworzyło się wzdłuż krawędzi wycofującego się lodu w Ameryce Północnej, zostało nazwane Jeziorem Agassiza (ryc. 12.3). Środek tego jeziora znajdował się w przybliżeniu tam, gdzie dziś leży jezioro Winnipeg w kanadyjskiej prowincji Manitoba, a w momencie jego maksymalnego rozwoju zajmowało ono obszar ponad cztery razy większy niż Jezioro Górne.

Prace Agassiza i innych pokazały, że północną Europą, większość Wysp Brytyjskich, Kanada i północna część Stanów Zjednoczonych w niezbyt odległej przeszłości geologicznej były pogrzebane pod kilkoma kilometrami lodu (ryc. 12.1). Owi pierwsi badacze nie mogli korzystać z izotopów promieniotwórczych czy innych współczesnych narzędzi analitycznych, aby datować i określić charakter okresu glacialnego. Wywnioskowali oni jedynie, że istniały niegdyś ogromne pokrywy lodowcowe, rozciągające się przypuszczalnie od bieguna północnego do szerokości geograficznych Europy i Ameryki Północnej zamieszkałych przez człowieka. Wskazywali na Grenlandię jako krainę analogicznych warunków, jakie wyobrażali sobie w przeszłości w okolicach Edynburga czy Montrealu. Dziś dzięki szczegółom zapisu geologicznego wiemy, że epoka lodowa ostatnich kilku milionów lat miała bardzo złożony przebieg. Pomysł, że pojedyncza pokrywa lodowa rozszerzała się od bieguna, jest w sposób oczywisty błędny. W rzeczywistości istniało

wiele centrów gromadzenia się lodu w Ameryce Północnej, Europie i Azji, z których rozplýwał się on we wszystkich kierunkach. Wiemy również, że pokrywa lodowa rozszerzała się i cofała w wielu zaskakująco regularnych cyklach i że klimat na dużych szerokościach geograficznych zmieniał się odpowiednio, począwszy od przypominającego dzisiejszy do bardzo zimnego. Strefy wegetacji na półkuli północnej - tundra w pobliżu lodu na północy, lasy iglaste i lasy liściaste dalej na południe - posuwały się w górę i w dół kontynentów niczym wiele armii, przemieszczających się tam i z powrotem wraz z rozra-

staniem się lub kurczeniem lodowców. W pobliżu równika zmiany te zaznaczały się *znacznie* słabiej, lecz na średnich szerokościach geograficznych były uderzające. Maksimum ostatniego zlodowacenia nastąpiło zaledwie 20 tysięcy lat temu i la-dolód rozciągał się wtedy aż na południe od Wielkich Jezior w Ameryce Północnej oraz pokrywał Skandynawię, północną Europę, część północnej Rosji i większość Wielkiej Brytanii. Prawie jedna trzecia obecnych lądów okryta była płaszczem lodu. Podobne warunki mogą zapanować w niezbyt odległej przyszłości; jeśli przeszłość stanowi jakiś wzór, to nasz obecny ciepły okres wkrótce się skończy. Ponieważ ciągle jeszcze nie wiemy dokładnie, co wywołuje zlodowacenia, możemy wyłącznie spekulować na ten temat.

## **Zapis zlodowaceń na lądzie**

Jak stwierdziliśmy w poprzednim rozdziale, zawartość izotopów tlenu w wodzie morskiej *zależy* zarówno od temperatury oceanów, jak i ilości lodu pochodzenia lodowcowego na kontynentach. Na szczęście spadek temperatury i tworzenie się lodu zmienia zawartość izotopów w tym samym kierunku, tak że nawet jeśli tych dwóch czynników nie da się rozdzielić, to czas wahań zlodowaceń pozostaje dobrze udokumentowany. Nagłe zmiany, jakie nastąpiły około 35 milionów lat temu w pobliżu granicy eocen-oligocen i ponownie w ciągu ostatnich kilku milionów lat (ryc. 11.4), zostały zinterpretowane jako odbicie początku zlodowacenia i szybkiego rozrostu kontynentalnych czap lodowych odpowiednio na Antarktydzie i w Arktyce.

Najlepiej udokumentowane jest ostatnie zlodowacenie półkuli północnej. Zapis izotopów tlenu z głębi morza wskazuje, że rozpoczęło się ono w przybliżeniu 3 miliony lat temu, a inne dowody to potwierdzają. Choć geologia glacialna od dawna ma wielu entuzjastów, w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat poświęcono szczególnie wiele wysiłku w skali międzynarodowej, aby zrozumieć zmiany klimatyczne, następujące w czasie Wielkiej Epoki Lodowej, i ich przyczyny. Jeśli możemy ufać przepowiedniom na

temat klimatu w przyszłości i jego zakłóceń, które mogą być spowodowane działalnością człowieka, to niezwykle ważne staje się zrozumienie niedalekiej przeszłości.

W zgodzie z wcześniejszą tradycją geolodzy, którzy jako pierwsi rozpoczęli badania osadów glacialnych Europy i Ameryki Północnej, starali się przedstawiać swoje obserwacje w kategoriach następstwa geologicznego. Nie mogli oni jeszcze korzystać z zegarów promieniotwórczych, które pojawiły się później, i musieli opierać się na korelacji zjawisk glacialnych między różnymi miejscami, aby stworzyć względną skalę czasową. Przeważnie każda kolejna faza rozrastania się lodowców usuwała świadectwa poprzedniego zlodowacenia, lecz w kilku miejscach znaleziono powtarzające się warstwy osadów glacialnych, na których podczas wolnych od lodu interglacjałów rozwinęły się gleby; zostały one ponownie pogrążane pod osadami okruczymi następnego nasuwającego się lodowca. W Europie i Ameryce Północnej szczegółowy zapis owych zdarzeń wskazuje na istnienie czterech lub pięciu odrębnych okresów, gdy lodowce pokrywały znaczne obszary półkuli północnej. Każdy z nich, zgodnie z długą geologiczną tradycją, otrzymał nazwę miejscowości, w której jego zapis skalny jest szczególnie dobrze zachowany. W przeciwieństwie jednak do wcześniejszych części geologicznej skali czasu, dla odpowiadających sobie przypuszczalnie okresów w Europie i Ameryce Północnej stworzono różne nazwy. Ponieważ skamieniałości w osadach glacialnych są rzadkie, trudno było skorelować poszczególne epizody po obu stronach Atlantyku. W Ameryce Północnej ostatnie zdarzenie zostało nazwane zlodowaceniem Wisconsin; w większości Europy odpowiadające mu zlodowacenie nazywa się Weichselian\*. Rozpoczęło się ono około 130 tysięcy lat temu, a jego zakończenie umieszcza się zwykle 10 tysięcy lat temu, choć jak dowodzi zapis izotopów tlenu (ryc. 12.4), objętość lodu zaczęła gwałtownie spadać wkrótce po szczycie zlodowacenia około 20 tysięcy lat temu i w zasadzie

nadal maleje do chwili obecnej. Dziś wiemy, że w czasie ostatniej epoki lodowej było znacznie więcej epizodów glacialnych niż cztery czy pięć zidentyfikowanych przez wcześniejszych badaczy. W rdzeniach wiertniczych z dna mórz, które w przeciwieństwie do osadów glacialnych na kontynentach zawierają zasadniczo ciągły zapis zmieniającego się klimatu w długich okresach, wyróżniono w ciągu ostatnich 2 milionów lat aż dwadzieścia cykli zlodowaceń.

Określenie sekwencji ostatnich kilku nasunięć i cofnięć lodowca na lądach było trudnym i pracochłonnym procesem. Wymagało sporządzenia szczegółowych map osadów pozostawionych przez lodowce, a ponieważ najwyraźniej zjawisko przebiegało odmiennie w wielu miejscach - prawdopodobnie lód nasuwał się w jednym regionie, gdy w tym samym czasie wycofywał się w innym - korelacja zdarzeń na dużych obsza-

racz nie zawsze wyglądała prosto. Techniki datowania opisane w rozdziale 6 pomagają, lecz nawet one nie są panaceum, ponieważ najbardziej przydatna metoda, datowanie za pomocą węgla  $^{14}$ , jest ograniczona do minionych 50 tysięcy lat, co stanowi mniej niż połowę ostatniego cyklu glacialnego. Większość innych technik nie likwiduje odwiecznego problemu datowania osadów, opisanego w rozdziale 6: osady glacialne nie zawierają zwykle składników, które utworzyły się w czasie depozycji. Oznacza to, że zmierzony wiek, powiedzmy ziarn żwiru w morenie lodowcowej, nie ma nic wspólnego z wiekiem zlodowacenia, lecz wskazuje, kiedy powstała skała źródłowa. Geolodzy są jednak pomysłowi i wynaleźli przeróżne metody badania wieku zjawisk glacialnych. Wulkany Gór Kaskadowych w zachodniej części Stanów Zjednoczonych, na przykład takie jak Mt. Saint Helens, wybuchały okresowo w ciągu ostatnich kilku milionów lat, a chmury popiołu pochodzące z dużych erupcji pozostawiały cienkie warstewki materiału wulkanicznego w osadach glacialnych na całym zachodzie i środkowym zachodzie. Mogą one być datowane za pomocą technik konwencjonalnych, które pozwolą nawet stwierdzić, z jakiego pochodzą wulkanu. Odkryto również, że to samo bombardowanie promieniami kosmicznymi, które wytwarza w atmosferze węgiel  $^{14}$ , chociaż

znacznie osłabione, dociera do powierzchni Ziemi i tworzy izotopy promieniotwórcze w skałach. Gdy świeżo oczyszczone skały podłoża odsłaniają się po długim okresie pogrzebania głęboko pod lodem, zostają wystawione na to promieniowanie, a ilość izotopów promieniotwórczych, które nagromadziły się w takich próbkach, jest miarą czasu, jaki upłynął od usunięcia pokrywy lodowej. Opracowano również kilka innych pomysłów metod, tak że stopniowo powstała dokładna chronologia zdarzeń glacialnych.

Jakie jednak zjawiska w zapisie skalnym nanosi się na mapy i datuje, aby poznać zasięg i wiek zlodowacenia w przeszłości? Do najbardziej oczywistych należą osady lodowcowe, takie jak moreny, gliny zwałowe i głazy narzutowe, które można obserwować w pobliżu dzisiejszych lodowców. Głazy narzutowe, jak sugeruje ich nazwa, są niezwyklejmi typami skał, różniącymi się od skał podłoża w okolicy, w której się znalazły; są to na przykład duże odłamki granitu w rejonie, gdzie występują tylko wapienie. Zdając sobie sprawę, że takie głazy musiały pochodzić z odległych obszarów, ludzie w zamierzonych czasach uważali, że były one transportowane wodami biblijnego potopu. James Hutton, jak już wspomniano, był jednym z pierwszych, którzy sugerowali, że głazy te zostały przeniesione przez lodowce. Głazy zwałowe to ogólny termin na określenie mieszanki nie wysortowanego materiału - począwszy od drobnoziarnistej gleby i gliny aż do żwiru i głazów - przenoszonego i

składanego przez lodowce. Jest ona pospolita w północnej Europie, w północnych Stanach Zjednoczonych i Kanadzie i stanowi najbardziej cenny pod względem ekonomicznym produkt uboczny lodowców - szczególnie tam, gdzie została przerobiona wodami płynącymi: to piasek i żwir dla budownictwa. Moreny to po prostu nagromadzenie gliny zwałowej w formie wyraźnych pagórów, zwykle wzdłuż krawędzi lodowca. Ich wielkość dostarcza wskazówek o zasięgu lodowców - na przykład niemal cała Long Island w Nowym Jorku jest moreną. Owe stworzone przez lód formy dają przyjemny, pofalowany krajobraz spotykany często w rejonie Wielkich Jezior w Ameryce Północnej.

Większość glin zwałowych złożonych przez kontynentalne lądolody pochodzi z odległych źródeł. Lodowce spływające na zewnątrz z regionów pokrytych najgrubszą warstwą lodu pod wpływem swego własnego ciężaru usuwały glebę, a nawet część skał podłoża. Zbierając żwir i fragmenty skał z podłoża, działały one jak gigantyczne kawałki papieru ściernego - wyrównywały topografię w jednych miejscach i wyostrzały ją w innych, gdzie mniej odporne jednostki skalne były usuwane, a twardsze mniej niszczone. Powstałe w ten sposób rysy lodowcowe są ciągle widoczne, osiągając rozmiary od centymetrów do dziesiątków kilometrów lub nawet więcej. Zdjęcia lotnicze i satelitarne pozwoliły geologom określić kierunki tych struktur oraz sporządzić mapy długich ciągów moren, niekiedy rozciągających się na setki kilometrów, i wyznaczyć kierunki przepływu lodu oraz zlokalizować miejsca, gdzie lód był najgrubszy. Badania dowiodły, że istniało wiele centrów, nawet w samej Ameryce Północnej. Gdy topniejące lodowce kurczyły się w kierunku tych centrów, w każdym in-terglacjale, *zrzuciły* swój ładunek piasku, żwiru, „mąki” skalnej i głazów narzutowych, grzebiąc wiele obszarów zlodowaconych pod nagromadzeniami gliny zwałowej.

Interesującym przyczynkiem do badań lodowcowych glin zwałowych jest odkrycie, że w kilku miejscach w Stanach Zjednoczonych zawierają one diamenty. Bezpośrednio na południe od Wielkich Jezior, w pobliżu południowej granicy zasięgu ostatniego lądolodu, wydobyto z osadów glacialnych około 80 diamentów różnej wielkości. Pierwszy z nich znaleziony został ponad 100 lat temu i dość szybko stwierdzono, że diamenty musiały zostać przyniesione przez lodowce gdzieś z północy. Diamenty powstają we wnętrzu Ziemi, na głębokości 200 kilometrów i więcej, i wynoszone są na powierzchnię wraz z rzadko spotykaną magmą wulkaniczną, zwaną kimberlitem. Obecność glin zwałowych zawierających diamenty sugeruje, że na północ od Wielkich Jezior, przypuszczalnie w okolicy Zatoki Hudsona lub Jamesa, występują kimberlity. Choć przeprowadzono niezliczone poszukiwania tych osadów, nie udało się ich znaleźć. Gdzieś w kanadyjskiej tundrze kopalnie diamentów czekają na odkrycie.

Lód nie jest materiałem o szczególnie dużej gęstości, niemniej jednak trzykilometrowej grubości lodowiec stanowi ogromne obciążenie ziemskiej skorupy. Tak jak usunięcie przez erozję materiału w regionach górskich powoduje wypiętrzenie skorupy (co opisano w rozdziale 4), tak obciążenie powoduje jej tonięcie. Skały powierzchniowe centralnej Grenlandii znajdują się dziś mniej więcej na poziomie morza wskutek obciążenia czapą lodową. Gęstość lodu równa się w przybliżeniu jednej trzeciej gęstości skał w płaszczu, tak że dodanie do skorupy trzech kilometrów lodu powinno spowodować jej zagłębienie się o jeden kilometr w podścielający ją plastyczny płaszcz. W rzeczywistości efekt ten może być mniejszy, ponieważ płaszcz, chociaż poddaje się temu, jest również bardzo lepki. Reakcja na zmieniającą się masę lodu lodowcowego - zarówno zagłębienie się, jak i wypiętrzenie - jest powolna. Jednakże w Skandynawii, Ameryce Północnej wokół Zatoki Hudsona i w innych regionach, gdzie nagromadzenia lodu były bardzo duże, w szczycie zlodowacenia skorupa została znacznie wgnieciona. W miarę jak lodowiec ustępował w czasie obecnego okresu interglacjalnego, skorupa ponownie powoli się wypiętrzała. W niektórych miejscach to wypiętrzanie, zwane odprężeniem lodowcowym, zachodzi dalej. Choć poziom morza również podnosił się w miarę topnienia ogromnych ła-dolodów, w większości miejsc łąd ulegał jeszcze szybszemu odprężeniu i po zniknięciu lodu ciągle się podnosił. Częstym rezultatem tego procesu są serie wyniesionych plaż, czyli dawnych wybrzeży, znajdujących się obecnie wysoko ponad poziomem morza. Podobnie jak inne zjawiska glacialne, zostały one naniesione na mapy i świetnie pokazują, gdzie lód osiągał największą grubość, ponieważ regiony te były najsilniej wgniecione i uległy najsilniejszemu odprężeniu. W wielu wypadkach wyniesione plaże datowano, stosując metodę węgla 14 do kawałków drewna lub innych materiałów organicznych w nich zawartych, a ta informacja pozwalała obliczyć tempo wypiętrzania. Klasycznym przykładem pokazanym na rycinie 12.2 jest Skandynawia. Wyniesione plaże i inne zjawiska glacialne posłużyły do skonstruowania koncentrycznych kontu-

rów wypiętrzenia skorupy, które rozpoczęło się po stopieniu lodu około 10 tysięcy lat temu i trwa nadal.

Warto wspomnieć o jeszcze dwóch skutkach ostatniego zlodowacenia, które kształtowały powierzchnię łąd. Jednym z nich jest szerokie rozprzestrzenienie lessów, drobnoziarnistych osadów przenoszonych przez wiatr i występujących na rozległych obszarach kontynentów, a drugim występowanie



przedziwnych krajobrazów, świadczących o gigantycznych po-wodziach.

Geneza lessów jest złożona, lecz wydaje się, że ten szczególny typ osadów powstał w czasie największego nasilenia okresów glacialnych. Niektóre lessy są po prostu mączką skalną przemieloną przez lodowce i rozniesioną przez wiatry, lecz niektóre mają inną genezę. W okresach glacialnych wnętrza kontynentów, szczególnie na średnich, ale nawet na dużych szerokościach geograficznych, były chłodniejsze i bardziej suche niż dzisiaj, a w wielu wypadkach miały mniejszą pokrywę roślinną. Również wiatry mogły być silniejsze. Powodowało to silniejszą erozję i transport drobnoziarnistego materiału. Wiemy, że wzrost zapylenia atmosfery miał zasięg globalny, ponieważ badania rdzeni lodowych, wywierconych zarówno na Antarktydzie, jak i na Grenlandii, świadczą o tym, że warstwy odpowiadające maksimum glacialnym są bardziej „zapyłone” niż inne części zapisu. Najślawniejsze osady lessowe występują w Chinach, gdzie wykonane przez człowieka jaskinie mieszkalne zostały wydrążone w lessach mających kilkaset metrów miąższości. Szczegóły delikatnie warstwowanej struktury lessów stanowią zapis wahań klimatu glacialnego, na równi z osadami głębokomorskimi, które omówię w następnym podrozdziale.

Gdy lądolody na półkuli północnej wycofywały się po maksimum zlodowacenia Wisconsin, wzdłuż ich południowych krawędzi powstały jeziora zastoisowe, takie jak Jezioro Agassiza. Ich zlewnia ulegała ciągłym zmianom w miarę wycofywania się lodu (a czasami nasuwania się lodowca podczas krótkich okresów zimnych), w miarę odprężania się skorupy po ustąpieniu lodowców oraz w miarę jak koryta rzek przecinały bariery skalne. Od czasu do czasu głębokie jeziora przerywały lodowe tamy lub inne przeszkody, tworząc nowe drogi przepływu i powodując katastroficzne powodzie. Jedno z takich zdarzeń, najlepiej udokumentowanych, dotyczy jeziora glacialnego położonego na obszarze będącym dzisiaj wschodnią częścią stanu Waszyngton na zachodzie Stanów Zjednoczonych. 12-16 tysięcy lat temu istniało tam duże jezioro Missoula, które przeszło powtarzające się cykle wypełniania, następnie przerwania bariery lodowej i uwol-

nienia ogromnych ilości wody w kierunku zachodnim, *poprzez* bazalty Wyżyny Kolumbii aż do rzeki Kolumbia. W trakcie takich zdarzeń powodziowych woda wyżłobiła w podłożu skalnym kaniony, wyrzeźbiła ogromne kotły erozyjne i pozostawiła gigantyczne pofałdowane struktury wysokości przeszło 5 metrów w odstępach ponadstumetrowych. Region dotknięty owymi glacialnymi powodziami znany jest jako Channel Scablands - nazwa odnosi się do unikatowej topografii tego obszaru. Zjawiska te długo wprawiały w zakłopotanie geologów,

szczególnie tych, którzy byli tak przywiązani do Huttonowskiej idei uniformitaryzmu, że nie mogli sobie wyobrazić okresowych zdarzeń katastroficznych kształtujących krajobraz, lecz w końcu zrozumiano, w jaki sposób do nich dochodziło. Rozpoznano wiele innych superpowodzi związanych z zanikaniem czap lodowych, zarówno w Eurazji, jak i w Ameryce Północnej. Przypuszczalnie naj-

wieksza z nich zdarzyła się około 8000 lat temu, gdy Jezioro Agassiza, wówczas połączone z innymi wzdłuż krawędzi rozpadającego się lądolodu kanadyjskiego (ryc. 12.3), przerwało nagle lód i wylało się na północ do Zatoki Hudsona. Choć tempo, w jakim to się stało, pozostaje nieznane, ilość uwolnionej wody była ogromna: ocenia się, że poziom morza we wszystkich oceanach podniósł się w rezultacie tej powodzi o 20-40 centymetrów!

### **Zapis zlodowaceń w głębokich morzach i w lodzie**

Najbardziej ciągły zapis zmian klimatu glacialnego zachował się w oceanach. Nawet w tropikach, z dala od bezpośredniego wpływu polarnych czap lodowych, osady wykazują zjawiska ściśle powiązane z cyklami rozszerzania się i wycofywania lądolodu. W rzeczywistości dopiero w momencie pozyskania do badań długich rdzeni osadów oceanicznych możliwe stało odczytanie prawdziwych szczegółów Wielkiej Epoki Lodowej. Choć w osadach istnieje wiele wskazówek dotyczących klimatu glacialnego, najprawdopodobniej najcenniejszy jest zapis składu izotopowego tlenu w wodzie morskiej.

W oceanie organizmy budujące muszle z węglanu wapnia zapisują w nich charakterystykę izotopów tlenu otaczających je wód, informującą o temperaturze wody i jej ilości związanej w lodzie lodowcowym. Dane pokazane na rycinie 11.4 wskazują, że w ciągu ostatnich kilku milionów lat następował ciągły spadek objętości oceanów i obniżenie temperatur. Gdy jednak powiększymy skalę, aby pokazać szczegóły ostatnich kilkuset tysięcy lat, tak jak na ryc. 12.4, zapis okaże się bardziej złożony.

Rycina ta przedstawia kilka godnych uwagi aspektów zagadnienia. Po pierwsze, zawartość izotopów tlenu w wodzie morskiej, a co za tym idzie - cykli glacialnych, zmieniała się w ciągu ostatniego pół miliona lat w zdumiewająco systematyczny sposób. Pokazano tutaj jedynie pięć okresów glacialnych, lecz jeśli rozciągniemy zapis wstecz do około 3 milionów lat, to schemat jest podobny. Wskazuje to na istnienie na przemian zimnych

i ciepłych okresów. Długość cykli pokazanych na rycinie 12.4 wynosi z grubsza 100 tysięcy lat. We wcześniejszym zapisie cykle wydają się nieco krótsze, lecz jest oczywiste, że ziemski kli-

mat zmienia się w bardzo regularny sposób. Rytm okresów glacialnych musi być zależny od jakiegoś czynnika zmieniającego się w podobny sposób. Na podstawie najnowszych badań można stwierdzić, że jedynym prawdopodobnym wytłumaczeniem jest czynnik pozaziemski; przypuszczalnie chodzi tu o ilość energii cieplnej otrzymywanej ze Słońca.

Po drugie, z ryciny 12.4 wynika, że pięć ostatnich zimnych okresów glacialnych trwało znacznie dłużej niż interglacjały i że rozpoczęcie okresów ciepłych następowało zwykle bardzo szybko po szczycie zlodowacenia. Jeśli obecny interglacjał ma ten sam charakter jak kilka poprzednich, nie będziemy musieli czekać długo na ponowne pogorszenie się klimatu, chociaż maksimum zlodowacenia Wisconsin nastąpiło zaledwie 20 tysięcy lat temu. Powody nagłego początku i krótkiego trwania okresów interglacialnych nie są znane.

Aż do tego momentu zakładaliśmy w dyskusji, że zmiany izotopów tlenu w sposób rzetelny dokumentują zmiany globalnej temperatury i pokrywy lodowej. Lecz czy jest tak rzeczywiście? Czy istnieją sposoby sprawdzenia w sposób niezależny takiego wniosku? Jeden z najbardziej przekonujących dowodów pochodzi ze źródła, które w pierwszej chwili wydaje się zupełnie nieprawdopodobne: chodzi o tropikalne koralce. Rafy koralowe rozwijają się blisko powierzchni morza. Jeśli poziom morza podniesie się o kilka metrów, koralce obumierają - lecz narastają na nich nowe, bliżej powierzchni oceanów. Ciągły wzrost ku górze pozwala rafom dotrzymać kroku podnoszącemu się poziomowi wody; są dzięki temu bardzo dobrymi wskaźnikami dawnego poziomu morza. W miejscach takich jak Karaiby zbadano rdzenie wiertnicze z raf, a ich wiek oznaczono metodą węgla 14 i innych technik. Koralce, które tysiące lat temu żyły w pobliżu powierzchni, znajdują się dzisiaj na głębokości dziesiątków metrów, pogrzebane w rafie przez swych potomków. Określając wiek koralu i głębokość, na której dziś spoczywają, skonstruowano zapis minionych poziomów morza (ryc. 12.5). Wynika z niego, że ostatnie obniżenie poziomu morza nastąpiło w tym samym czasie, w którym dane uzyskane z izotopów tlenu wskazały maksimum glacialne - około 20 tysięcy lat temu. Rycina ta pokazuje również, że w ciągu ostatnich 20 tysięcy lat istniały dwa lub trzy momenty bardzo szybkiego, niemal natychmiastowego w skali geologicznej, podniesienia się poziomu morza - przypuszczalnie w odpowiedzi na szczególnie szybkie topienie się pokrywy lodowej. W ciągu minionych 20 tysięcy lat poziom oceanów podniósł się o ponad 110 metrów, powodując zalanie dużych obszarów, które były suchym lądem w szczytowym okresie zlodowacenia.

Choć skład izotopów tlenu w dawnej wodzie morskiej dostarczył przypuszczalnie więcej szczegółowej informacji na temat

tego, jak działa cykl glacialny, niż jakiekolwiek inne świadectwa, nie jest to jedyna wskazówka zawarta w osadach oceanicznych. Kopalny zapis planktonu pokazuje, że - jak można było oczekiwać - obszary zasiedlane przez gatunki ciepłolubne kurczyły się w czasie epizodów glacialnych, a rozprzestrzeniały w interglacjale. Niektóre gatunki gorzej znoszące niskie temperatury wymierały podczas okresów glacialnych. Ziarna pyłków przynoszone do oceanów przez rzeki oraz wiatr i zachowane w osadach są również bogatym źródłem informacji na temat warunków klimatycznych w czasie cykli glacialnych. Badania pyłków zachowanych w osadach z rdzeni pobranych wzdłuż zachodniego wybrzeża Ameryki Północnej, a także z innych obszarów, świadczą o tym, że zespoły roślinne w poszczególnych miejscach zmieniały się w zgodzie z cyklami wyznaczonymi przez izotopy tlenu. Różne wskazówki pochodzące z osadów oceanicznych dostarczyły razem znacznie wyraźniejszego obra-

zu zmian klimatycznych w czasie Wielkiej Epoki Lodowej, niż można było uzyskać wyłącznie z zapisu lądowego. A w ostatnich latach arsenał badaczy złodowaceń wzbogacił się o nowe źródło danych: jest nim sam lód. Zarówno na Antarktydzie, jak i na Grenlandii wykonano głębokie wiercenia w czapach lodowych. Zmiany temperatury i wielkości opadów pomiędzy zimą a latem, nawet w wypadku bardzo zimnej Antarktydy, są wystarczające, aby pozostawić w gromadzącym się lodzie warstewki roczne, tak że rdzenie mogą być bardzo precyzyjnie datowane poprzez pracochłonne zliczanie takich warstewek. Najgłębsze wiercenia sięgają do około 250 tysięcy lat temu, obejmując dwa cykle glacialne. Izotopy tlenu w lodzie stanowią uzupełnienie zapisu w wodzie morskiej. Co więcej, rdzenie lodowe zawierają inne informacje, których nie można uzyskać z osadów oceanicznych. O świadectwach dotyczących „zapylenia” atmosfery już wspomniano, lecz przypuszczalnie najcenniejsze wskazówki dotyczą rzeczywistego składu atmosfery. W momencie powstania lodu więzi małe bąbelki gazów atmosferycznych; skrupulatne wydobywanie ich z próbek lodu z rdzenia pozwoliło geochemikom zrekonstruować zmiany w składzie atmosfery w przeszłości. Jednym ze szczególnie interesujących rezultatów takich badań jest odkrycie, że w przeszłości zachodziły wahania koncentracji dwóch gazów szklarniowych, dwutlenku węgla i metanu, co mogło powodować zmiany temperatury. Koncentracja tych gazów zmieniała się systematycznie w zgodzie z cyklami izotopów tlenu, tak że ich zawartość w atmosferze była znacznie niższa w czasie okresów chłodnych i wyższa podczas interglacjalów. O to, czy jest to przyczyna, czy skutek, toczą się ciągle *zazarte* spory.

## **Co powoduje globalne złodowacenie?**

Gdy poznamy odpowiedź na to pytanie, wielu naukowców pra-

cujących obecnie nad tym zagadnieniem będzie musiało skupić energię twórczą na innych problemach. Trzeba przyznać, że dość dobrze zbadano warunki konieczne lub co najmniej

wystarczające, aby pograżyć Ziemię w chłódzie. Mniej jasna jest natomiast natura mechanizmu inicjującego, który powodowałby tak regularne wahania pomiędzy okresami ciepłymi i zimnymi w ciągu minionych kilku milionów lat. Nie brak pomysłów, lecz żaden mechanizm nie wyłonił się jako zdecydowany faworyt. Wydaje się oczywiste, na podstawie zgromadzonych dowodów, że musiały istnieć złożone powiązania i sprzężenia zwrotne pomiędzy kilkoma różnymi czynnikami, które osobno nie są zdolne zainicjować obserwowanych zmian, lecz działając wspólnie, mogą je powodować. Aby zachwiać równowagę, wystarczy niewielka zmiana. W skali globalnej różnice temperatury między okresami glacialnymi a interglacialnymi mogły wynosić zaledwie kilka stopni Celsjusza, a w najgorszym wypadku 10°C.

Dawno znaną cechą zlodowacenia, która nabrała dużego znaczenia w momencie odkrycia tektoniki płyt, jest to, że polarne czapy lodowe nie mogą tworzyć się na otwartym morzu. Jeśli nawet inne czynniki powodują oziębienie planety, to zlodowacenie na wielką skalę może nastąpić tylko wtedy, gdy na dużych szerokościach geograficznych znajduje się ląd. Wielki kontynent Antarktydy położony jest mniej więcej na biegunie południowym i bez wątpienia z tego powodu istniejąca tam dziś czapa lodowa powstała wcześniej niż na półkuli północnej i stanowi ona ważne zjawisko nawet w czasie ciepłych okresów interglacialnych, takich jak obecny. Rekonstrukcje położenia kontynentów w innych okresach z przeszłości, dla których istnieją świadectwa rozległych zlodowaceń, niezmiennie pokazują w pobliżu biegunów duże masy lądowe. Na kontynentach południowych, na przykład, składających się na Gondwanę (Indie, Australia, Afryka, Antarktyda i Ameryka Południowa), występują wszędzie góry zwałowe, rysy lodowcowe i inne świadectwa istnienia pokrywy lodowej z okresu późnego paleozoiku, około 250-300 milionów lat temu. Właśnie wtedy Gondwana położona była na biegunie południowym.

Kontynenty na dużych szerokościach geograficznych są niezbędne dla pojawienia się epoki lodowej, lecz równie konieczne są dwa inne czynniki: obfite opady śniegu i niskie temperatury, szczególnie w lecie. Paradoksalnie, pierwszy z tych warun-

ków wymaga umiarkowanie ciepłych wód oceanicznych, przynajmniej na średnich szerokościach geograficznych, aby wzmacniać parowanie i dostarczać wilgoci atmosferycznej dla opadów w regionach polarnych. Jak wspomniano w rozdziale II, jedną z teorii wyjaśniających inicjację zlodowacenia na półkuli północnej głosi, że powstanie około 3 milionów lat temu Przesmyku Panamskiego skierowało ciepłe wody Oceanu

Atlantyckiego na północ i spowodowało wzrost opadów we wschodniej Kanadzie, na Grenlandii i w Skandynawii - czyli w trzech głównych centrach grubych nagromadzeń lodu. Lecz nawet duże opady śniegu nie zapoczątkują epizodu glacialnego, jeśli w całości stopnieje on latem. Muszą jeszcze panować odpowiednio niskie temperatury, aby rzeczywiście zachodziła

akumulacja.

Temperatura w każdym miejscu na powierzchni Ziemi zależy od wielu czynników, lecz w skali globalnej najważniejsze jest to, jak wiele energii otrzymuje Ziemia ze Słońca, a raczej: o ile więcej pochłaniają oceany i atmosfera, niż jest wypromieniowane w przestrzeń. Zanim się dowiedzieliśmy, że Ziemia podlegała cyklicznym zlodowaceniom i ociepleniom, matematycy i astronomowie wykazali, że ilość energii otrzymywanej ze Słońca w dowolnym miejscu na Ziemi musiała zmieniać się w regularny sposób w przeszłości, co wynika z kształtu ziemskiej orbity. Astronomiczna teoria zlodowaceń jest przypisywana Milutinowi Milankovićowi, jugosłowiańskiemu matematykowi żyjącemu w latach 1879-1958; rzeczywiście, jest on człowiekiem, który szczegółowo opracował tę ideę w jej obecnej postaci. Lecz jeszcze przed Milankovićem pojawiały się sugestie, że zlodowacenie może być rezultatem zmian orbity ziemskiej, które spowodowały, iż do Ziemi docierało mniej energii słonecznej. Zapewne najbardziej wybitnym spośród zwolenników tej hipotezy był szkocki intelektualista James Croll, który opublikował swoje rozważania w 1864 roku. Historia Crolla jest interesująca: gdy wydano jego artykuł na temat zlodowacenia, ten samouk pracował jako dozorca, co stanowiło tylko jedno z kilku jego zajęć, uprawianych podczas badań dotyczących różnych tematów. W końcu doceniono jego talent i został

*przyjęty* do Szkockiej Służby Geologicznej; lecz w miarę upływu czasu coraz mniej wiary dawano jego pomysłom na temat epoki lodowej. Wysuwano różne argumenty, a najważniejszym z nich było przekonanie, że wahania w ilości energii słonecznej otrzymywanej *przez* Ziemię spowodowane zmianami orbity są zbyt małe, aby mogły być odpowiedzialne za znaczne zmiany klimatyczne.

Milanković rozpoczął swoje badania matematyczne nad zmianami ziemskiej orbity i ich wpływem na klimat długo po śmierci Crolla, gdy teorie tego ostatniego zostały zupełnie zapomniane. Pierwszy artykuł Milankovića został opublikowany w latach dwudziestych naszego wieku, a wszystkie obliczenia wykonano ręcznie, co było gigantyczną pracą. Milanković wyliczył wahania ilości energii słonecznej, otrzymywanej przez półkule północną w ciągu ostatnich 600 tysięcy lat. W swoich obliczeniach przyjął on (później czyniono podobnie), że ilość energii

wypromieniowywanej przez Słońce pozostawała stała w tym okresie. To założenie teorii Milankovića jest przedmiotem sporów, ponieważ nawet małe zmiany produkcji energii słonecznej mogły mieć znaczne konsekwencje dla Ziemi. Przyjmując stałą ilość energii, Milanković musiał jednak brać pod uwagę trzy różne sytuacje, które mogły wpływać na zmianę ilości energii padającej na powierzchnię Ziemi: małe regularne wahania kąta nachylenia osi Ziemi w kierunku Słońca, niewielkie zmiany w kształcie eliptycznej orbity Ziemi, powodujące, że znajduje się ona bliżej lub dalej od Słońca w punktach skrajnych orbity, i powolną rotację ziemskiej orbity, stopniowo przesuującą moment największego zbliżenia do Słońca z zimy na lato i z powrotem. Wahania te działają w różnej skali czasowej, czasami się wzmacniają, a kiedy indziej znosząc wzajemnie, ważne jednak, że są regularne. Podobnie jak wcześniejsze prace Crolla, obliczenia Milankovića po ich opublikowaniu wywołały początkowo duże poruszenie, ogromnie uaktywniając badaczy usiłujących powiązać znane osady glacialne z cyklami Milankovića. Jednakże gdy ponownie, jak wobec pomysłów Crolla, wysunięto szereg wątpliwości, praca Milankovića utraciła znaczenie. Sytuacja zmieniła się gwałtownie, gdy geolodzy uzyskali możli-

wość wydobywania i badania rdzeni osadów głębokomorskich. Jak to stwierdziliśmy, osady złożone w ciągu minionych kilku milionów lat charakteryzują się godnymi uwagi, regularnymi zmianami wielu właściwości związanych z cyklami glacialnymi. W ostatnich latach obliczenia Milankovića powtórzono za pomocą komputera, dokonując pewnych uściśleń, lecz zasadniczo historia pozostaje ta sama. Niekiedy wysuwany jest argument, że zmiany w otrzymywanej ilości energii spowodowane owymi cyklami nie są wystarczające, aby zainicjować lub zakończyć okres glacialny. Symulacje matematyczne dawnego klimatu, uwzględniające wahania Milankovića, dość dobrze zgadzają się z rzeczywistym zapisem geologicznym, co przekonało wielu naukowców pracujących w tej dziedzinie, że czynniki astronomiczne są istotne, działając być może jako mechanizm spustowy - jako przysłowiowa kropla wody przepelniająca dzban.

Cykle Milankovića pokazują, w jaki sposób zmieniała się w czasie ilość energii słonecznej otrzymywanej przez Ziemię; pozostaje jednak pytanie, jak wiele tej energii jest zatrzymywane? To problem jeszcze bardziej złożony niż obliczenie zmian orbity, ponieważ *zależy* między innymi od położenia lądów i mórz, charakteru powierzchni lądu i składu atmosfery. Woda morska na przykład pochłania większość otrzymywanej energii słonecznej, podczas gdy lód lub pustynie znaczną jej część odbijają. Kontynentalne czapy lodowe dostarczają więc dodatkowego sprzężenia zwrotnego, odbijając energię słoneczną i powodując dalsze ochładzanie się planety samą swoją obecno-

ścią. Lecz czapy lodowe występują na dużych szerokościach geograficznych, gdzie ilość energii padającej na jednostkę powierzchni jest znacznie mniejsza niż w tropikach, a więc efekt ochładzania przez lodowce na dużych szerokościach geograficznych byłby zniósłony przez odpowiednie rozmieszczenie lądów - istnienie dużych oceanów i nielicznych kontynentów na małych szerokościach geograficznych. Zmiany położenia kontynentów są jednak bardzo powolne i choć muszą one wpływać na czułość Ziemi wobec innych parametrów, nie mogą tłumaczyć szybkich przejść od warunków glacialnych do interglacialnych Wielkiej Epoki Lodowej.

Z kolei skład atmosfery ulega zasadniczym zmianom w krótkiej skali czasowej. Analizy gazów uwiecznionych w lodzie z Grenlandii i Antarktydy świadczą o tym, jak już wspomniano, że zawartość zarówno dwutlenku węgla, jak i metanu w atmosferze podlegała zmianom zgodnym ze zmianami klimatu w czasie cykli glacialnych. Oba te gazy szklarniowe powstrzymują ciepło wypromieniowane z ziemskiej powierzchni przed ucieczką w przestrzeń; rdzenie lodowe wskazują, że koncentracje obydwu tych gazów były wyższe w okresach ciepłych i obniżały się w czasie okresów zimnych. Z dokładniejszych badań czasu tych zmian wynika jednak, że w większości wypadków pozostawały nieco w tyle za zmianami temperatury. Jeśli potwierdzą to dalsze badania, należy je raczej uznać za wynik cykli glacialnych niż ich przyczynę. Lecz nawet wtedy powinny one wzmacniać wahania temperatury, tak że wyższe koncentracje gazów szklarniowych utrzymywałyby Ziemię nieco cieplejszą w okresach interglacialnych, a niższe - pozwalałyby na dalsze ochładzanie podczas epizodów glacialnych.

Nawet z tego krótkiego omówienia jasno wynika, że istnieje wiele odpowiedzi na pytanie, co jest przyczyną globalnego zlodowacenia. Ponieważ w grę wchodzi tak dużo czynników, a każdy z nich oddziałuje z innymi, pojawienie się dużych i bardzo szybkich komputerów stało się dobrodziejstwem dla dalszych badań nad klimatem epoki glacialnej. Umożliwiają one symulację warunków klimatycznych, reagujących na różną ilość  $\text{CO}_2$  w atmosferze, różną konfigurację kontynentów, części cykli Milankovića i wiele innych potencjalnie ważnych czynników. Literatura naukowa pełna jest artykułów dyskutujących Ogólne Modele Cyrkulacji (dla specjalistów GCMs, od angielskiego *General Circulation Models*), które mogą przewidywać rozkład temperatury i wiatrów oraz wiele innych czynników klimatycznych dla różnych, ewentualnych warunków w przeszłości. Dzięki modelom matematycznym opracowanym dla tych symulacji zdobyliśmy wiele pożytecznych informacji. Podobnie jak długoterminowa prognoza pogody, są one jednak bardzo czułe na zmiany w założeniach i ich przewidywania pozostają dokładne tylko w takim stopniu, w jakim twórcy mo-



deli uwzględnili oddziaływanie wszystkich czynników. W końcu jednak to informacja pochodząca z samej Ziemi, czyli zapis w skałach, będący odbiciem rzeczywistych zmian klimatycznych w przeszłości, jest kamieniem probierczym dla wszystkich teoretycznych rozważań.

## **Klimaty glacialne, ewolucja człowieka i początki cywilizacji**

Najstarsze znane skamieniałości hominidów (*Hominidae* są rodziną biologiczną, do której należy nasz własny rodzaj *Homo*) liczą prawie 4,4 miliona lat. Znalaziono je w Etiopii wraz z osadami popiołów wulkanicznych dających się dość precyzyjnie datować, tak że znamy dobrze ich wiek. Najprawdopodobniej hominidy te były naszymi bezpośrednimi przodkami.

Okolo 800 tysięcy lat po okresie, w którym żyły te wczesne hominidy, interesujący zapis kopalny powstał tam, gdzie dziś leży Tanzania, prawie 2000 kilometrów od miejsca występowania skamieniałości etiopskich. Seria erupcji wulkanicznych pokryła tam okolice warstwami drobnych popiołów wulkanicznych. Po deszczach popiół zachowywał się jak mokry cement i każde stworzenie, które po nim przeszło, pozostawiało ślady, tworząc zapis życia zwierzęcego, jakie rozkwitało w tej części Afryki. Lecz poza tropami wszystkich zwierząt, począwszy od królików aż do słoni, to świadectwo życia sprzed ponad 3,5 miliona lat ukazuje coś więcej: odciski stóp wędrującej przez okolice grupy hominidów. Stworzenia, które pozostawiły owe ślady, najprawdopodobniej były podobne do hominidów z Etiopii. Niektórzy z naukowców badających owe kopalne ślady uważają, że pozostawiła je grupa rodzinna - matka, ojciec i dziecko - lecz, co być może ważniejsze, odciski stóp wskazują, że te wczesne hominidy poruszały się na dwóch nogach, podobnie jak współcześni ludzie. Okolo 4 milionów lat temu lub nawet wcześniej nasi przodkowie zeszli z drzew tropikalnych lasów Afryki i rozprzestrzenili się na trawiastych równinach, poruszając się w pozycji wyprostowanej. Wielu paleontologów uwa-

ża, że to przejście spowodowane było stopniowym przekształcaniem się klimatu w coraz bardziej suchy, co w Afryce nastąpiło w momencie globalnego ochłodzenia klimatu, powodującego redukcję lasów i zwiększenie obszarów trawiastych. Prawdziwie surowy klimat Wielkiej Epoki Lodowej ciągle jeszcze nie nadszedł, choć i tak mógł on mniej dawać się we znaki w tropikach niż na większych szerokościach geograficznych.

Australopiteki, jak nazywa się owe skamieniałości etiopskie (i inne podobne hominidy), miały mały mózg. Zapewne były dwunożne, lecz najprawdopodobniej nieszczególnie bystre. Niemniej żyły kilka milionów lat, przez jakiś czas równoległe z naszym własnym rodzajem. *Homo* po raz pierwszy występuje

wśród skamieniałości hominidów w Afryce około 2 milionów lat temu. W tym samym mniej więcej czasie pojawiają się w osadach proste obrobione narzędzia kamienne. Jedną z najbardziej uderzających cech nowego hominida jest jego duży mózg, przynajmniej w porównaniu z mózgiem któregośkolwiek z poprzedzających go gatunków *Australopithecus*. Dlaczego *Homo* pojawia się w tym właśnie czasie, a jego mózg jest większy od mózgu wcześniejszych hominidów? Podobnie jak w innych kwestiach omawianych w tej książce, brak definitywnej odpowiedzi na to pytanie, takiej, z którą wszyscy by się zgadzali; wysunięto natomiast wiele hipotez. Zgodnie z jedną z hipotez związek między pojawieniem się *Homo* i początkiem zlodowacenia półkuli północnej nie jest przypadkowy. Zmieniający się klimat, a szczególnie naprzemienne występowanie długich glacjałów i krótkich interglacjałów, mógł sprzyjać hominidom zdolnym do adaptacji do nowych warunków, a więc osobnikom pomysłowym i inteligentnym. W Afryce epizody glacjałowe były chłodne i suche, a życie - prawdopodobnie trudniejsze niż w czasie ciepłych i stosunkowo wilgotnych interglacjałów. Czy ta interpretacja jest prawdziwa, nie wiemy. Lecz ogromne zmiany środowiskowe, towarzyszące cyklom zimnego i ciepłego klimatu, powtarzające się regularnie w ciągu minionych kilku milionów lat, musiały odegrać rolę w wymuszaniu migracji i izolowaniu populacji zarówno *Homo*, jak i innych zwierząt. Nieunikniona była szybka ewolucja nowych gatunków

i podgatunków, dobrze widoczna wśród ssaków w ogóle i, oczywiście, w rodzaju *Homo*.

Około miliona lat temu jeden z gatunków, *Homo erectus*, opuścił Afrykę i rozprzestrzenił się w Europie i Azji. Skamieniałości hominidów są rzadkie i antropologowie oraz paleontologowie mieli trudności, starając się prześledzić linię ewolucyjną współczesnego człowieka; wiemy jednak, że 100 tysięcy lat temu, w początkach ostatniego epizodu glacjałowego, grupa *Homo sapiens*, znana jako neandertalczykowie, żyła w Europie i na Bliskim Wschodzie. Pomimo dość karykaturalnych przedstawień neandertalczyka jako nierozgarniętego jaskiniowca z maczugą, ludzie ci posiadali duży mózg - równie duży jak nasz - tworzyli społeczności i musieli być stosunkowo inteligentni. W Europie klimat ciągle się pogarszał - nadciągała kulminacja okresu glacjałowego. Neandertalczykowie znikają jednak z zapisu kopalnego około 30 tysięcy lat temu, kiedy zostają zastąpieni przez istotę bliższą współczesnemu człowiekowi, zwaną człowiekiem z Cro-Magnon. Pojawił się on w Afryce dziesiątki tysięcy lat wcześniej, przywędrował do Europy około 45 tysięcy lat temu i przez czas jakiś współistniał z neandertalczykiem. W przeciwieństwie do neandertalczyków, ludzie z Cro-Magnon najwyraźniej szyli okrycia i budowali prymitywne schronienia; najprawdopodobniej byli też lepiej przygotowani do życia w surowym klimacie. Doświadczyli oni bezpośrednio

warunków epoki lodowej w Europie i pozostawili piękne malowidła jaskiniowe - obrazy wymarłych dziś zwierząt, które wędrowały po skutej lodem Europie, takich jak ogromne, owłosione i zaopatrzone w ciosy mamuty.

Poza klimatem, ważnym czynnikiem w ewolucji człowieka związanym ze zlodowaceniem, były wahania poziomu morza towarzyszące cyklom glacialnym. Niski poziom morza podczas maksimum zlodowacenia Wisconsin spowodował odsłonięcie bardzo dużych obszarów suchego lądu, dziś znajdującego się pod wodą; wczesnemu człowiekowi, jak również innym zwierzętom, otwierało to drogi migracji. Pomiedzy Australią i Nową Gwineą istniało wówczas połączenie lądowe. Do Indonezji można było dotrzeć suchą stopą lub przebyć tylko krótki odcinek

podróży przez wodę; *Homo sapiens* przedostał się tam z Azji. Przypuszczalnie najlepiej znanym rezultatem obniżenia się poziomu morza jest zasiedlenie przez człowieka w czasie ostatniego maksimum glacialnego obu Ameryk. Dwadzieścia do trzydziestu tysięcy lat temu można było przedostać się z Rosji na Alaskę lądem przez Cieśninę Beringa. Mamuty i inne wielkie ssaki dotarły do Ameryki Północnej przez most lądowy Beringa i mniej więcej w szczytowym okresie zlodowacenia Wisconsin poszli za nimi nasi ciekawscy syberyjscy współplemieńcy. Choć znaczna część wschodniej Syberii i Alaski nie była pokryta lodem, na północy Ameryki Północnej zalegał lodowiec, a nowi imigranci nie mogli podróżować na wschód czy południe, dopóki klimat się nie ocieplił, przechodząc w obecny interglacjał, a lodowce nie cofnęły. Istnieją ciągle kontrowersje dotyczące dokładnej chronologii tych migracji, lecz na ogół się uważa, że gdy wzrosły temperatury, na linii północ-południe otworzył się korytarz pomiędzy lodowcami Gór Skalistych na zachodzie a cofającym się w kierunku Zatoki Hudsona lądolodem na wschodzie, pozwalając na migrację do terenów południowych o cieplejszym klimacie. Wiemy, że około 12 tysięcy lat temu ludzie żyli w południowo-zachodnich Stanach Zjednoczonych, a przed 10 tysiącami lat zasiedlili także Amerykę Południową.

Choć nasi bezpośredni przodkowie ucierpieli wskutek trudnych warunków, panujących podczas zlodowacenia Wisconsin, cywilizacja ludzka, którą znamy, rozwinęła się w czasie epizodu interglacialnego. Klimat jednak nie był tak stabilny i wyrównany, jak skłonni jesteśmy sądzić na podstawie krótkiego odcinka czasu, odpowiadającego naszemu życiu. Paleo-klimatolodzy w sposób imponujący odtworzyli szczegóły klimatyczne w ciągu minionych kilku tysięcy lat, posługując się różnymi świadectwami, począwszy od pisanego przekazu historycznego aż po zmiany grubości pierścieni przyrostowych dawnych drzew. Badania te nie pozostawiają wątpliwości, że w przeszłości zachodziły duże wahania warunków klimatycznych w skali regionalnej i lokalnej. Przedmiotem gorącej debaty pozostaje jedynie wpływ owych zmian na rozwój cywilizacji.

Z podobnym problemem stykają się ci, którzy badają wymierania w odległej przeszłości geologicznej: powiązanie przyczyny i skutku.

Wiemy, że nawet lokalna, krótkotrwała zmiana klimatu wywiera ogromny wpływ na populację ludzką. Współczesnym tego przykładem może być okres wielkiej suszy w latach trzydziestych w centralnych Stanach Zjednoczonych; w połączeniu ze złą gospodarką rolną spowodowała ona zubożenie ekonomiczne, a w końcu zmusiła tysiące mieszkańców Oklahomy do emigracji do Kalifornii. Ten epizod amerykańskiej historii został uwieczniony w powieści Johna Steinbecka *Grona gniewu*. Lecz planeta od początków cywilizacji była sceną jeszcze większych zmian klimatycznych. Tylko o niektórych z nich mogę tutaj wspomnieć.

Początki rolnictwa są powszechnie uważane za początki cywilizacji. Zgodnie z tym rozpoczęła się ona mniej więcej jednocześnie w Starym i Nowym Świecie. Mamy świadectwa udomowienia owiec i uprawy sprzed 6-7 tysięcy lat na Bliskim Wschodzie. Mniej więcej w tym samym czasie ludzie z południowego Meksyku zaczęli uprawiać kukurydzę. Badania klimatyczne wskazują, że był to również czas klimatycznego optimum obecnego interglacjału, charakteryzujący się średnimi temperaturami znacznie wyższymi niż dzisiejsze, a także obfitymi opadami na prawie całej Ziemi. Prawdę mówiąc, brak dowodów istnienia jakichkolwiek dużych pustyń w tym czasie. Czy jest to tylko jeszcze jedna przypadkowa zbieżność, czy może zachodzi związek pomiędzy tym łagodnym klimatem a pojawieniem się cywilizacji?

Kilka tysięcy lat po tym optimum klimatycznym, około 4200 lat temu, nagle upadło rozkwitające dotąd imperium akadyjskie, które istniało na Bliskim Wschodzie, mniej więcej między dzisiejszą Turcją i Zatoką Perską. W jego północnych regionach szybko upadało rolnictwo. Jak wiemy z zapisów znalezionych na glinianych tabliczkach, znaczna część populacji migrowała do miast na południu imperium, położonych nad Tygrysem i Eufratem, co było wielkim ciężarem dla ówczesnych władców, gdyż spowodowało kryzys uchodźców. Przez

dziesięciolecia archeolodzy zastanawiali się nad przyczynami owych wydarzeń. Ze współczesnych prac wynika, że początek tego kryzysu zbiega się z nagłą suszą w północnej części imperium akadyjskiego, trwającą około 300 lat. Taką zmianą klimatyczną tłumaczy dobrze udokumentowane migracje, ponieważ rolnictwo w regionach północnych zależało od regularnych

opadów, nie mając rozwiniętego systemu nawadniania. Rzeki Tygrys i Eufrat na południu stanowiły znacznie pewniejsze źródła wody.

Trudno wskazać przyczynę owej hipotetycznej zmiany klimatycznej, która miała dotknąć imperium akadyjskie; w każdym razie pewni archeolodzy uważają, że sama w sobie nie byłaby ona wystarczająca, aby wyjaśnić nagły upadek tej cywilizacji. Lecz z bliższych nam czasów znamy jeszcze lepiej udokumentowany przypadek wpływu nagłej zmiany klimatycznej na życie człowieka. Nieco ponad 1100 lat temu, w końcu IX wieku, w regionie północnoatlantyckim doszło do ocieplenia klimatu stosunkowo łagodnego przez następne 300 lat lub nieco dłużej (klimatolodzy nazwali ten okres małym optimum). Oprócz zapisów historycznych (które rzadko wspominają o zjawiskach klimatycznych), roczne wahania izotopów tlenu w rdzeniach lodowych z Grenlandii potwierdzają, że taki ciepły okres rzeczywiście nastąpił w tym czasie. To wtedy wikingowie, norwescy żeglarze i poszukiwacze przygód zasiedlili niektóre części Grenlandii. Korzystając ze stosunkowo mało zalodzonych wód północnego Atlantyku, zapuścili się oni na zachód i dotarli do Ameryki Północnej. W Nowej Fundlandii istnieje dobrze zachowana (i odtworzona) osada datowana w przybliżeniu na rok 1000; przypuszczalnie odpowiada ona miejscu wspomnianemu w sagach wikingów jako Yinland. Wikingowie nie pozostali jednak długo w Ameryce Północnej; przegrali konkurencję z rdzennymi Amerykanami, którzy przybyli na ten kontynent tysiące lat wcześniej - nie z Europy, lecz z Syberii.

W końcu XIV wieku klimat w regionie północnego Atlantyku ponownie pogorszył się do tego stopnia, że najpierw utrudnił kontakty pomiędzy Skandynawią a osadami wikingów na Grenlandii, a następnie praktycznie je uniemożliwił. Ostatecz-

nie ci, którzy jeszcze tam pozostali, wyginęli. Mała epoka lodowa, jaka nastąpiła po małym optimum, trwała od około 1450 roku do roku 1850 i jej skutki są widoczne daleko poza Grenlandią. W czasie optimum klimatycznego nastąpił rozwój rolnictwa i populacji europejskiej, lecz w czasie następującego po nim okresu chłodnego wystąpiły powodzie, głód i zaraza. Szczególnie w niektórych regionach północnych, gdzie w czasie klimatycznego optimum zbiory były obfite, zimno przyniosło powtarzające się nieudane zbiory. Liczne obszary wiejskie opustoszały i wystąpiły okresowe rozruchy. Populacje dotknięte klęską głodu nie zdołały obronić się przed zarazą. Źródła historyczne wyraźnie świadczą o surowości klimatu w Europie: holenderscy mistrzowie malowali łyżwiarzy na kanałach w Holandii, a w XVII wieku - zimowe „mrozowe targi” na pokrytej lodem Tamizie w Londynie. Rzeka ta nie zamarzała ponownie od 1814 roku.

Opisane właśnie wahania klimatyczne trwały krótko, zbyt krótko, aby je wiązać bezpośrednio ze znacznie dłuższymi cyklami glacialnymi. Były one również zlokalizowane tylko na ob-

szarze Europy i północnego Atlantyku. Większość badaczy uważa, że zmiany te zaszły pod wpływem cyrkulacji oceanicznej; chodzi przede wszystkim o ilość ciepłej wody wpływającej do północnego Atlantyku z południa. Przyczyny takich nagłych zmian cyrkulacji, czy są charakterystyczne dla okresów interglacjalnych, czy też nie, pozostają nieznane, choć ostatnie badania rdzeni lodowych z Grenlandii sugerują, że około 130 tysięcy lat temu poprzedni interglacjał charakteryzował się zmiennością klimatu o jeszcze krótszym okresie trwania niż obecnie. Być może tylko łut szczęścia sprawił, że rozwój społeczeństwa przemysłowego w ciągu ostatnich 150 lat przypadł na dość stabilny klimat.

Współczesny człowiek jest w pewnym sensie prawdziwym potomkiem Wielkiej Epoki Lodowej. Rodzaj *Homo* pojawił się w Afryce po tym, jak na półkuli północnej rozpoczęło się zlodowacenie, a rozprzestrzenienie się naszego gatunku na wszystkie kontynenty globu nastąpiło w czasie zlodowacenia Wis-consin, związanego z niskim poziomem morza. Często trudno

jest rozdzielić przyczynę i skutek lecz, jak się wydaje, zmienność interglacjalnego klimatu w czasie minionych 10 tysięcy lat miała znaczący wpływ na rozwój ludzkiej cywilizacji. Jednakże 10 tysięcy lat w geologicznej skali czasu to bardzo krótki okres. Jeśli nauczyliśmy się czegoś, studiując historię geologiczną, to powinniśmy rozumieć, że zmiany zachodzą ciągle w każdej skali czasowej, w jakiej badamy Ziemię: zmiany ewolucyjne, zmiany w konfiguracji kontynentów i oceanów, zmiany klimatyczne. Krótka podróż przez czas geologiczny, którą odbyliśmy w tej książce, zapoznała nas jedynie z nielicznymi zmianami, jakie nastąpiły w ciągu 4,5 miliarda lat istnienia naszej planety. Zapis geologiczny, zapis w skałach kończy się dzisiaj na ciepłym interglacjalnym okresie Wielkiej Epoki Lodowej. Pozostaje nam jedynie zapytać o to, jakich zmian możemy spodziewać się w przyszłości.

## ROZDZIAŁ 13

CO DALEJ? GEOLOGIA A

CZŁOWIEK

W bardzo długiej perspektywie los naszej planety jest określony: osmałą jej powierzchnię palące płomienie Słońca, kiedy rozszerzy się ono i stanie czerwonym olbrzymem. Podobnie jak niemal wszystkie gwiazdy, Słońce produkuje energię w reakcjach jądrowych w gęstym wnętrzu, gdzie atomy wodoru są ściśnięte razem tak silnie, że łączą się, tworząc cięższe pierwiastki i uwalniając jednocześnie ogromne ilości energii. Na podstawie obserwacji innych gwiazd we Wszechświecie wiemy, że gdy wodór w tym procesie ulegnie zużyciu, wewnętrzna część Słońca zapadnie się, tworząc jeszcze bardziej gęste jądro, podczas gdy zewnętrzna „chłodniejsza” otoczka (dalej jednak o temperaturze tysięcy stopni) rozszerzy się, zbliżając się do orbity Ziemi i pochłaniając wszystko na swojej drodze. Lecz zdarzy się to w przyszłości oddalonej o miliardy lat, tak odległej od chwili obecnej, jak powstanie Ziemi w przeszłości, i równie trudnej do wyobrażenia. Do tego czasu nasz gatunek dawno przestanie istnieć.

Jesteśmy jeszcze pewni kilku innych *rzeczy* na temat przyszłości Ziemi. Temperatura jej wnętrza, napędzająca tektonikę płyt, a pochodząca częściowo z rozpadu promieniotwórczego, częściowo zaś będąca pozostałością z okresu tworzenia się Ziemi 4,5 miliarda lat temu, powoli się obniży, lecz w tempie tak powolnym, że procesy geologiczne, które podtrzymuje, naj-

prawdopodobniej zachowają swą obecną postać przez miliardy lat, być może do ostatnich dni naszej planety. Baseny oceaniczne będą powstawały i zanikały, kontynenty zderzały się ze sobą, tworząc wielkie łańcuchy górskie, które następnie zostaną zrównane do poziomu morza w wyniku gwałtownej fizycznej i chemicznej erozji; a gdy zapanują odpowiednie warunki, Ziemia może pograżyć się w kolejnej epoce lodowej. W czasie podróży przez przestrzeń kosmiczną nasza planeta prawie na pewno zderzy się czołowo z kawałkami kosmicznych okruchów, zaśmiecających Układ Słoneczny. Choć nie są one duże w skali kosmicznej, okażą się jednak wystarczająco wielkie, aby im-pakt zmienił zasadniczo - choć na krótko - w skali geologicznej - warunki panujące na powierzchni Ziemi.

Natomiast za życia następnych kilku pokoleń nasza planeta będzie narażona na inne, bardziej bezpośrednie zagrożenia. Je-

den z moich kolegów, odczuwa dumę, gdy mówi, że najważniejszym czynnikiem zmian geologicznych w tej szczególnej chwili ziemskiej historii jest człowiek. Jesteśmy pierwszym gatunkiem zdolnym modyfikować powierzchnię planety, jej atmosferę i klimat w sposób globalny i zasadniczy. Rycina 13.1. pokazuje, jak zmieniała się populacja ludzka na Ziemi w czasie oraz w jaki sposób rozwijało się jedno z naszych oddziaływań na środowisko - emisja dwutlenku węgla do atmosfery. Znacznie większe zmiany zawartości dwutlenku węgla niż pokazane na tej ilustracji powodowane były w przeszłości przyczynami naturalnymi. O ile jednak możemy to stwierdzić, zachodziły one *znacznie* wolniej, a ich skutki, choć poważne dla niektórych roślin i zwierząt, nie oddziaływały na takie złożone społeczeństwo jak nasze, które jest bardzo subtelnie przystosowane do przeciętnego klimatu ostatnich kilkuset lat. Jeśli wzrost zawartości CO<sub>2</sub> w atmosferze, jak przewiduje wielu naukowców, spowoduje globalny wzrost temperatury o kilka stopni, to konsekwencje tego będą wstrząsające. Zanikną całe produktywne pasy rolnicze lub przynajmniej będą się nadawały do zupełnie innych upraw niż obecnie. (Regiony zaś położone na dużych szerokościach geograficznych, mające dziś marginalne znaczenie rolnicze, szczególnie w Rosji i Kanadzie, nagle uzyskają ogromny

potencjał, jeśli chodzi o produkcję żywności). Wraz ze wzrostem temperatury podniesie się poziom morza, ponieważ nastąpi dalsze topnienie czap lodowych, a poza tym woda oceaniczna zwiększy objętość w miarę ogrzewania, powodując zalanie wielu gęsto zasiedlonych, nisko położonych regionów, a inne czyniąc bardziej podatnymi na tropikalne sztormy. Dopóki człowiek nie przestanie używać kopalnych paliw, których spalanie jest głównym źródłem CO<sub>2</sub> dostarczanego do atmosfery, nikt nie ma możliwości powstrzymania wzrostu jego stężenia, choć prawdopodobnie zgodne, międzynarodowe współdziałanie może wzrost ten nieco spowolnić. Po jakimś czasie społeczeństwo bez wątpienia przystosuje się do zmian, których nie da się uniknąć. Ponieważ jednak będą one zachodziły szybko, nawet w skali czasowej człowieka, najprawdopodobniej nie obejdzie się bez trudności i zniszczeń w wielu regionach świata.

Nie jest wykluczone, że wzrost temperatury, który niewątpliwie nastąpi w wyniku emisji dwutlenku węgla do atmosfery, będzie przeciwdziałał tendencji do pogrążania się Ziemi w następnej epoce glacialnej. Według długoterminowych prognoz, przedstawionych na rycinie 12.4, znajduje się ona tuż za rogiem. Małe jest jednak prawdopodobieństwo, że te dwa efekty dokładnie się zrównoważą. Większość naukowców badających ten problem uważa, że ocieplenie spowodowane przez CO<sub>2</sub> przeważa i że znajdujemy się w przededniu „superinterglacja-lu”, który będzie trwał aż do chwili zużycia



zasobów paliw kopalnych. Do tego czasu, czyli przez kilka stuleci, zawartość dwutlenku węgla w atmosferze co najmniej trzykrotnie przewyższy jego koncentrację w okresie preindustrialnym. Stopniowo nadmiar CO<sub>2</sub> ulegnie absorpcji w oceanach, a brak nowych źródeł spowoduje, że jego koncentracja w atmosferze spadnie, pozwalając w końcu Ziemi wejść w nieco opóźniony okres glacjałny.

W długiej, geologicznej perspektywie zmiany spowodowane przez człowieka, takie jak wzrost zawartości CO<sub>2</sub> w atmosferze, stanowią drugorzędne zaburzenia. Po przeczytaniu tej książki nikt nie powinien mieć wątpliwości, że Ziemia ulegała w przeszłości znacznie silniejszym zakłóceniom środowiskowym, mimo że ich zapis w skałach jest, ogólnie rzecz biorąc, ledwo uchwytny. Jeśli jutro człowiek zniknąłby z naszej planety, to za kilka milionów lat ślady naszej tu obecności byłyby słabo widoczne. Lecz ograniczony czas naszego życia powoduje, że uwaga większości ludzi skupia się na krótszych okresach. W takiej skali również można snuć pewne przewidywania, ponieważ rozumiemy procesy zachodzące na Ziemi i wiemy, czego możemy oczekiwać w najbliższej przyszłości.

## Ograniczoność naszych zasobów naturalnych

Geologia jako nauka zawdzięcza swój rozwój w znacznej mierze poszukiwaniom surowców naturalnych. Aż do niedawna większość profesjonalistów w tej dziedzinie szukała pracy w prze-

myśle naftowym lub wydobywczym. I rzeczywiście, liczebność studentów na wydziałach geologii w *college'ach* i na uniwersytetach w całej Ameryce Północnej ściśle odpowiadała dobrem i złym okresom najważniejszych przedsiębiorstw poszukiwawczych, będących głównym pracodawcą absolwentów geologii. Po długotrwałym spadku cen ropy, przy jednoczesnym silnym nacisku na ochronę środowiska w ostatnich latach, obraz ten ulega zmianie. Lecz odkrywanie i wydobywanie materiałów koniecznych naszej cywilizacji to ciągle ważne aspekty nauk o Ziemi, a przy tym dziedzina, której perspektywy są dość obiecujące.

Od czasów starożytnych poszukiwacze, którzy chcieli odnaleźć użyteczne i cenne kopaliny, kierowali się intuicją, doświadczeniem i inteligencją. W czasach współczesnych do ich arsenału dołączyła technika, a szczególnie możliwość zdalnego prowadzenia badań, co pozwala na poszukiwania surowców w oddalonych, trudno wcześniej dostępnych obszarach oraz w głębinach oceanicznych i wglębnych częściach kontynentów. Czy poszukiwania owe warte są aż takich wysiłków? Choć małe ilości prawie każdego pierwiastka chemicznego z układu okresowego występują nawet w najbardziej pospolitych materiałach - złoto jest rozpuszczone w oceanach, miedź obecna w

glebie w ogrodzie - są one tam bardzo rozproszone, nie nadają się do wydobycia w sposób ekonomicznie opłacalny. Nawet glin, będący trzecim pod względem występowania pierwiastkiem w skorupie ziemskiej, nie może być pozyskiwany gdziekolwiek. Jednakże w ziemskiej historii procesy geologiczne doprowadziły do powstania koncentracji glinu i wielu innych pierwiastków, tworząc cenne złoża. Sztuka polega na tym, aby odkryć mechanizmy tych procesów i dzięki tej wiedzy ułatwić poszukiwania złóż, z których wydobycie będzie opłacalne. Poszukiwania takich złóż prowadzi się ciągle, stają się one coraz bardziej wyrafinowane, lecz duże połacie Ziemi zostały już dość szczegółowo przebadane i nowe odkrycia następują rzadko. Technika pozwala ekstrahować pożądane materiały ze złóż, które niegdyś uważano za pozbawione wartości; trzeba jednak pamiętać, że zasoby geologiczne nie są niewy-

czyerpywalne. Powstawały w ciągu kilku miliardów lat ziemskiej historii i w ludzkiej skali czasu nie są odnawialne. W niektórych wypadkach uszczuplamy je od dziesięcioleci.

Najbardziej może uderzający jest przykład ropy naftowej. Ma ona niezwykle znaczenie dla współczesnych społeczeństw, tak więc tworzenie się i występowanie złóż ropy zostało zbadane bardzo szczegółowo, a na poszukiwania i wydobycie tej naturalnej substancji wydano miliardy dolarów. Choć ropa występująca w postaci „wycieków” powierzchniowych znana jest od tysięcy lat i używana do bardzo różnych celów, pierwszy szyb naftowy wywiercono w Pensylwanii w 1859 roku.\* Małe przedsiębiorstwo, znane wówczas pod nazwą Drake's Folly, zrodziło gigantyczny światowy przemysł, który rozwinął się praktycznie w każdym zakątku Ziemi. Zanim upłynęło 100 lat od powstania pierwszego odwiertu, każdego dnia pompowano z ziemi miliony baryłek ropy i nieliczne głosy przezornych zaczęły przepowiadać, że nasza nieograniczona konsumpcja tych nieodnawialnych zasobów może przynieść straszne konsekwencje. Choć najbardziej złowieszcze przepowiednie się nie sprawdziły, głównie wskutek wydajniejszego sposobu zużycia energii, spowolnienia światowego rozwoju ekonomicznego i odkrycia nowych zasobów, nie ma wątpliwości, że w końcu zabraknie nam ropy i gazu naturalnego. Nie wiemy, kiedy się to stanie. Geologiczne zasoby ropy, choć tworzyły się w ciągu milionów lat, dostępne będą w obfitości zaledwie przez kilka stuleci!

Tak rozrzutnie zużywane zasoby w postaci substancji, która napędza nasze samochody, w rzeczywistości są dawną energią słoneczną przechowaną przez naturę jako ropa. Jej skład chemiczny to głównie węgiel połączony z 15-20% wodoru. Ropa powstaje jedynie w bardzo specyficznych środowiskach geologicznych, a mianowicie w mulistych osadach, odkładanych w ciepłych, płytkich morzach. W miejscach takich organiczne szczątki planktonu, unoszących się w toni małych organizmów żyjących w oświetlonej słońcem przypowierzchniowej części

oceanu, szybko gromadzą się na dnie morskim i ulegają pogrzebaniu. Chroni to szczątki organiczne przed zniszczeniem, lecz procesy zamieniające ten bogaty w węgiel rozproszony materiał w ropę są złożone. Kluczowymi czynnikami w tym procesie wydają się temperatura i czas. W miarę jak substancja organiczna zostaje pogrzebana coraz głębiej, poddawana jest wpływowi coraz wyższej temperatury. Najbardziej sprzyjający wytworzeniu płynnej ropy zakres temperatur to 65-150°C, co zwykle odpowiada głębokości kilku kilometrów. Lecz nawet jeśli materiał organiczny przekształcił się w ropę, jest ona trudna do wydobycia z drobnoziarnistych osadów, w których powstała. Jedynie gdy ropa występuje w osadach gruboziarnistych, mających liczne przestrzenie porowe, takich jak piaskowce, może być łatwo odzyskana. Na szczęście ropa jest płynem o niskiej gęstości - pływa po wodzie - i z czasem migruje ku górze, niekiedy przedostając się do sąsiednich formacji skalnych. Najbardziej produktywne pola roponośne występują więc nie w skałach, w których ropa powstała, lecz w sąsiednich porowatych warstwach.

Nawet taka szczątkowa informacja dotycząca powstawania ropy naftowej upraszcza ogromnie poszukiwania jej złóż. Ponieważ do jej powstania konieczna była obfitość organizmów morskich, to skały pochodzące sprzed okresu kambryjskiego, gdy istoty żywe występowały rzadko, są mało prawdopodobnymi źródłami ropy. To samo dotyczy silnie zmetamorfizowanych skał dowolnego wieku, które poddane były temperaturom zbyt wysokim, aby ropa nie uległa zniszczeniu, jeśli nawet niegdyś ją zawierały. Zasobów ropy poszukuje się przede wszystkim w osadach fanerozoicznych, powstałych w płytkich morzach wzdłuż krawędzi dzisiejszych i dawnych kontynentów lub w morzach śródlądowych, które okresowo zalewały kontynenty. Doświadczenia zgromadzone w czasie wierceń w takich regionach pozwalają również przewidzieć dość dokładnie, ile ropy i gazu pozostaje wciąż nie odkryte. To właśnie te przewidywania, wraz z ocenami tempa zużycia zasobów w przyszłości, pozwalają na stwierdzenie, że za 100 lat większość ziemskich zasobów ropy zostanie wyczerpana (ryc. 13.2). Niestety, stosunkowo różowe

w porównaniu z potrzebami, krótkoterminowe perspektywy wydobycia ropy zacmiewają potrzebę troski, wskazującej na braki, jakie niewątpliwie wystąpią po dłuższej eksploatacji. A zatem musimy zastąpić ropę używaną do wytwarzania tak różnych produktów, jak odzież z włókien sztucznych, nawozy, lekarstwa, innymi źródłami energii i surowcami.

Choć przykład ropy i gazu jest wstrząsający i przywołuje do rzeczywistości, dotychczasowe zużycie wielu innych zasobów

geologicznych również musi się zmienić. Co więcej, podobnie jak ropa i gaz, rozprzestrzenienie tych materiałów zależy od *czynników geologicznych*, nie respektuje granic politycznych, co sprawia, że zależność współczesnego, uprzemysłowionego społeczeństwa od określonych zasobów jest szczególnie ryzykowna.

Dobry przykład stanowi tutaj kobalt - niezbędny składnik stopów używanych do produkcji stałych magnesów, silników odrzutowych i innych zaawansowanych technicznie urządzeń. Stany Zjednoczone, a także większość krajów rozwiniętych, w zasadzie nie mają własnych złóż kobaltu. W końcu lat siedemdziesiątych podczas wojny domowej w Zairze, będącym głównym dostawcą kobaltu, wywindowano jego cenę dziesięciokrotnie w stosunku do poprzedniej. Nie trwało to długo, niemniej stanowiło istotne przypomnienie ograniczonego charakteru zasobów mineralnych.

Niektórzy entuzjaści przestrzeni kosmicznej zasugerowali, że Księżyc, czy nawet planetoidy, mogą stanowić w przyszłości źródło surowców dla Ziemi. To prawda, na Księżycu występują wszystkie niezbędne pierwiastki chemiczne, lecz ich wydobycie wymagałoby ogromnych ilości energii. Inaczej niż na Ziemi, procesy geologiczne na Księżycu w większości nie przebiegały tak, aby powstały złoża mineralne podobne do znanych nam. Na naszej planecie zaskakująco wiele mechanizmów powodujących ich nagromadzenia zależy od obecności wody w stanie płynnym. Niektóre złoża powstają przez bezpośrednie wytrącanie z wody morskiej - na przykład żelaziste formacje wstęgowe, omawiane w rozdziale 4, stanowią większość naszych zasobów rud żelaza. Inne są produktem wietrzenia wspomaganego przez wodę - glin ulega koncentracji tam, gdzie silne opady i wysokie temperatury w regionach tropikalnych powodują wypłukanie z lokalnych skał prawie wszystkich składników, pozostawiając jedynie nierozpuszczalny, bogaty w glin materiał, zwany boksytem. Złoto i wiele innych cennych metali często występuje w żyłach, ponieważ osadzane są tam przez gorące, bogate w wodę roztwory, które przepływają przez spękania w skałach skorupy ziemskiej. Księżyc jest pozbawiony wody, co wiąże się z jego powstaniem, i większość procesów powodujących koncentrację minerałów na Ziemi nigdy tam nie zachodziła. W rezultacie cenne pod względem ekonomicznym pierwiastki występują w skałach księżycowych jedynie w formie rozproszonej. Wydaje się, że przynajmniej w bliskiej przyszłości nienasycony apetyt na surowce naturalne musi być

zaspokajany z ziemskich źródeł. Musimy więc opracować metody wydajnego wydobycia materiałów z uboższych rud, gospodarować oszczędnie i powtórnie przerabiać cenne materiały

oraz nie ustawać w poszukiwaniu substytutów pewnych najrzadszych minerałów i pierwiastków. Z tego powodu zmieniała się (przynajmniej częściowo) rola geologów. Nie ograniczają się oni już do eksploatacji licznych złóż ziemskich surowców mineralnych; stali się gospodarzami zasobów, których ograniczoność jest znana. Geolodzy dysponują wiedzą niezbędną do oceny długoterminowych konsekwencji zużywania podstawowych materiałów w dzisiejszym tempie i niektórzy z nich starają się nakłonić zarówno rządy, jak i całe społeczeństwa do bardziej odpowiedzialnego korzystania ze złóż naturalnych.

## Prawdopodobieństwo impaktu

Zapis geologiczny nie pozostawia nadziei, że w przyszłości Ziemię ominą zderzenia z ciałami niebieskimi. Obecna debata pomiędzy naukowcami dotyczy jedynie prawdopodobieństwa bardzo dużego impaktu, siejącego spustoszenie na dużym obszarze, i ewentualnych sposobów uniknięcia nieszczęścia.

Ślady gigantycznego zderzenia sprzed 66 milionów lat i globalnego kryzysu, który prawdopodobnie doprowadził do wyniszczenia dinozaurów oraz wielu innych stworzeń, omówiono w rozdziale 10. Ciało, które spowodowało katastrofę na granicy K-T, było przypuszczalnie planetoida, której orbita przypadkiem przecięła się z orbitą Ziemi. Przyjmuje się na ogół, że wielkie katastrofy, takie jak ów impakt, są rzadkie w geologicznej skali czasu. Lecz często nie zdajemy sobie sprawy, że setki, a być może nawet tysiące planetoid o średnicy ponad 100 metrów (a zatem zdolnych spowodować poważne zniszczenia, gdyby uderzyły w naszą planetę) przez cały czas krążą po orbitach przecinających się z orbitą Ziemi. Każda z nich może uderzyć w Ziemię i geologiczne - a nawet historyczne - zapisy świadczą o tym, że *zdarzało* się to regularnie w przeszłości. Jakie jest więc prawdopodobieństwo ponownego impaktu i ja-

kie zniszczenia może on spowodować? Przedsięwzięto obecnie wysiłki, aby odpowiedzieć na te pytania. Choć przewidywania zawsze pozostawiają element niepewności, zagrożenie jest na tyle realne, że wzniciło poważną dyskusję co do możliwości wczesnego rozpoznania, a być może nawet zmiany kierunku ruchu obiektów, które zagrażałyby Ziemi. Jedną z najnowszych analiz, wykonaną przez Clarke'a i Chapmana z Instytutu Badań Planetarnych w Tucson w Arizonie i Davida Morrisona z Centrum Badań im. Amesa NASA w Kalifornii, opublikowana została w czasopiśmie naukowym „Nature” w 1994 roku. Szansa, że planetoida wystarczająco duża, aby spowodować zniszczenia środowiska oraz śmierć znacznej części światowej populacji, uderzy w Ziemię w ciągu następnych 100 lat, oceniona jest w niej na jeden do 10 tysięcy. To bardzo niskie prawdopodobieństwo, lecz jedynie w terminach statystycznych,

ponieważ liczba ewentualnych ofiar jest tak duża, że dla przeciętnego Amerykanina groźba utraty życia w wyniku impaktu jest mniej więcej taka sama jak śmierci w katastrofie lotniczej. Bezpieczeństwo lotów słusznie stanowi przedmiot troski zarówno rządów, jak i obywateli. Czy powinno to również dotyczyć wykrywania planetoid?

Informacje konieczne do oceny prawdopodobieństwa impaktu pochodzą z różnych źródeł, łącznie z zapisem geologicznym. Ponieważ atmosfera chroni nas przed małymi ciałami, które w wyniku rozgrzania spowodowanego tarciem spalają się, zanim osiągną powierzchnię Ziemi, oraz ponieważ wietrzenie skał i tektonika płyt ciągle zmieniają krajobraz, powierzchnia naszej planety nie jest tak gęsto poznaczona kraterami, jak powierzchnie niektórych naszych sąsiadów w Układzie Słonecznym. Niemniej istnieje wiele dobrze udokumentowanych przykładów impaktów, na przykład krater meteorytowy w Arizonie; jest to stosunkowo młoda i dobrze znana struktura impaktowa. Wiele równie dużych ziemskich kraterów uderzeniowych rozpoznano na podstawie kolistego kształtu dopiero po przyjrzeniu się im z powietrza lub z przestrzeni kosmicznej za pomocą satelitów. Stare, zniszczone części ziemskiej skorupy, takie jak prekambryjska Tarcza Ka-

nadyjska w Ameryce Północnej, kryją wiele starych kraterów. Pogrzebane pod przykryciem skał osadowych i gleby, zachowały się na szczęście aż do ostatniego zlodowacenia półkuli północnej, które usunęło ochronną pokrywę, odsłaniając ponownie kraterzy na powierzchni. Dokładne badania średnicy i wieku tych i innych kraterów pozwoliły geologom stworzyć bazę danych, dokumentującą częstość zderzeń Ziemi z ciałami o różnych rozmiarach. Podobne, nawet bardziej szczegółowe dane pochodzą z badań kraterów na Księżycu (przypominam rycinę 3.1), który nie ma ochronnej atmosfery i na którym nie zachodzą procesy, takie jak wietrzenie czy tektonika płyt, niszczące kraterzy na Ziemi. Tak więc ogromne połacie księżycowej powierzchni stały się bezstronnymi kronikarzami wszystkich impaktów w ciągu miliardów lat.

Nagromadzone dowody świadczą o tym, że ciała o najmniejszych rozmiarach, posiadające jednak energię bomby jądrowej zrzuconej na Hiroszimę pod koniec drugiej wojny światowej, zderzają się z Ziemią każdego roku! Ich rzeczywiste, fizyczne rozmiary są niewielkie; chroni nas przed nimi atmosfera i w wyniku tarcia spalają się lub eksplodują bardzo wysoko nad powierzchnią Ziemi. Gdyby nie zostały odnotowane przez satelity szpiegowskie, nie zdawalibyśmy sobie nawet sprawy z ich istnienia. Obiekty niosące sto razy większą energię - a jednego lub dwóch takich można oczekiwać w ciągu stulecia - także nie dosięgną ziemskiej powierzchni. Jednakże znacznie większe fragmenty planetoid krążą w przestrzeni w pobliżu Ziemi, a w stosunkowo niedawnej przeszłości zdarzyły się

dobrze udokumentowane przypadki zarówno bliskiego rozminięcia się, jak i zderzenia z Ziemią. Takie bliskie rozminięcie zdarzyło się w 1989 roku, gdy planetoida o średnicy kilkuset metrów, niosąca energię odpowiadającą ponad 1000 megaton TNT, minęła nas w odległości mniejszej niż dwukrotna odległość Ziemi do Księżyca. Nieco inna orbita mogłaby spowodować zderzenie tego obiektu z naszą planetą, powodując katastrofę. Utworzyłby on niewątpliwie na powierzchni krater o wielokilometrowej średnicy (lub spowodował gigantyczne fale, lądując w oceanie). Taka

planetoida, gdyby rzeczywiście zderzyła się z Ziemią, wywołałaby zniszczenia sto razy większe niż obiekt wspomniany w rozdziale 3, który eksplodował w atmosferze nad Syberią w 1908 roku. Katastrofa tunguska, jak się to wydarzenie nazywa, została odnotowana w Europie jako atmosferyczna fala uderzeniowa, a gdy wiele lat potem naukowcy w końcu dotarli na to odległe pustkowię, znaleźli las zniszczony na powierzchni ponad 2000 kilometrów kwadratowych i dowody na to, że eksplozja spowodowała pożary w centrum tego regionu. Nigdy nie znaleziono fragmentów planetoidy, lecz ostatnie wyliczenia sugerują, że był to prawdopodobnie obiekt kamienny, który eksplodował w atmosferze na wysokości około 10 kilometrów. Na szczęście okolica nie była zasiedlona; gdyby spadł w zamieszkałej okolicy, doszłoby do tragedii.

Duże impakty są rzadkie, lecz ich potencjalne skutki niosą typ ryzyka geologicznego zupełnie odmiennego niż inne procesy. Kolizje, podobne do tej, która zakończyła okres kredowy, wyrzucają w górę do atmosfery tak dużo drobnych okruchów, że - z wyjątkiem światła pożarów rozpalonych przez impakt - cała kula ziemską pogrążyłaby się na pewien czas w zupełnych ciemnościach. Nawet znacznie mniejsze impakty mogłyby zredukować oświetlenie słoneczne do takiego poziomu, że przez okres dłuższy niż jeden sezon wegetacyjny rolnictwo nie mogłoby istnieć, co spowodowałoby ogólnoswiatową katastrofę; żaden kraj nie zostałby oszczędzony i nie mógłby, jak to się dzieje w wypadku powodzi, trzęsień ziemi lub suszy, pomóc innym w potrzebie. Na szczęście naprawdę duże obiekty o średnicy kilometra lub więcej najłatwiej wykryć w przestrzeni. Technika pozwala znaleźć i śledzić orbity takich ciał. Również czułe teleskopy i sumienne obserwacje ostrzegą nas prawdopodobnie dość wcześnie (co najmniej z kilkuletnim wyprzedzeniem), a to pozwoliłoby opracować i zastosować strategię uniknięcia zderzenia z obiektami, które zmierzałyby do kolizji z Ziemią. Zmiana kierunku planetoidy byłaby bardzo drogim rozwiązaniem, lecz nie wydaje się, żeby ktokolwiek protestował przeciw podniesieniu kosztów ochrony Ziemi przed potencjalnym zniszczeniem.

## Wulkany i trzęsienia ziemi

Znacznie bardziej bezpośrednio, choć jednocześnie nie mające globalnego zasięgu, niebezpieczeństwo dla człowieka stanowią duże trzęsienia ziemi i erupcje wulkaniczne. Są to zjawiska, o których myśli większość ludzi, gdy wyobraża sobie katastrofy geologiczne. Przy obecnym stanie wiedzy na temat procesów zachodzących na Ziemi, stosunkowo prostą sprawą jest ustalenie prawdopodobieństwa takich zdarzeń. Można powiedzieć prawie ze stuprocentową pewnością, że w ciągu następnych kilkuset lat nastąpi w San Francisco lub w Tokio duże trzęsienie ziemi, niosące wielkie zniszczenia, lub że wybuchnie wulkan Saint Helens. Ciągłe jednak nie można określić z dużym wyprzedzeniem, kiedy dokładnie coś takiego się zdarzy lub, co równie ważne, jak będzie silne. Poczyniono jednak postępy w prognozach krótkoterminowych. W większości wypadków polega to na skrupulatnym monitorowaniu regionów szczególnie zagrożonych, zarówno za pomocą instrumentów, jak i dzięki prostym obserwacjom. W kilku przypadkach, gdy uznano, że grozi bezpośrednio niebezpieczeństwo, dokonano ewakuacji na wielką skalę. Przykładem jest ewakuacja ludności w 1975 roku z wulkanicznej wyspy Gwadelupy na Karaibach; uznano erupcję za nieuniknioną. Tak się jednak nie stało. Trzy miesiące później mieszkańcy powrócili do swych domów, a do katastrofy nie doszło, rozgorzała jedynie dyskusja, czy decyzja o ewakuacji była rozsądną i, oczywiście, o możliwości dokonywania dokładnych przewidywań. Przyroda jest jednak kapryśna i dużo czasu upłynie, zanim zaczniemy rozpoznawać sygnały będące naprawdę zapowiedzią erupcji czy trzęsienia ziemi. Tymczasem najprawdopodobniej popełnimy inne pomyłki, lecz wydaje się, że lepiej uwzględniać ostrzeżenia, niż je ignorować. Życie to potwierdziło niedługo po epizodzie z Gwadelupą, gdy geolodzy kolumbijscy ostrzegli, że nawet mała erupcja wulkanu Nevado del Ruiz stopi śnieg i lód na jego szczycie. Ogromne potoki popiołu wulkanicznego i mułu mogły, ich zdaniem, *zagrozić* miastu Amero u jego podnóża. Przestrogi zostały zignorowane; potoki błota ruszyły kilka miesięcy później, zabijając 25 tysięcy osób.

W rozdziale 5 o tektonice płyt dowiedzieliśmy się, że prawdopodobieństwo erupcji wulkanicznej i trzęsienia ziemi jest największe wzdłuż granic płyt. Na bezpośrednio ryzyko *narażone* są miejsca zbiegania się płyt w strefach subdukcji. Rzut oka na rycinę 5.2 wystarczy, by stwierdzić również, że wiele z tych regionów jest gęsto zaludnionych; *znaczna* część zachodniego wybrzeża Ameryki Północnej, Środkowej i Południowej, Japonia i Indonezja oraz niektóre części basenu Morza Śródziemnego leżą w pobliżu stref subdukcji. Na wszystkich tych obszarach występowały w czasach historycznych trzęsienia



ziemi i wulkanizm i zapewne powtórzą się one w przyszłości. Katastrofy *zdarzają*, się jednak w dużych odstępach czasu, często przedzielone jednym lub kilkoma pokoleniami, i dlatego nie zaznaczają się bardzo w ogólnej świadomości.

Gdyby nawet geologiczne niebezpieczeństwo zagrażało w niezbyt odległym terminie, reakcja na nie może być co najmniej przytłumiona. San Francisco, jedno z najpiękniejszych, lecz również jedno z najbardziej narażonych na ryzyko trzęsienia ziemi miast w Stanach Zjednoczonych, jest również najbardziej pożądanym miejscem zamieszkania w kraju i ma odpowiednio wygórowane ceny posiadłości. Choć miasto to nie leży w strefie subdukcji, przecina je uskok San Andreas, a kilka innych dużych uskoków występuje w pobliżu. Trzęsienie Ziemi z 1906 roku (spowodowane pęknięciem wzdłuż uskoku San Andreas) i wywołane nim pożary zniszczyły centrum. Często przypomina o tym prasa, lecz dzisiejsi mieszkańcy najczęściej nie chcą myśleć o zagrożeniu i cieszą się pięknem miasta, licząc, że następne duże trzęsienie nie zdarzy się w bliskiej przyszłości. Tymczasem tektoniką płyt gwarantuje nam, że z pewnością do niego dojdzie, i choć dzięki współczesnym przepisom budowlanym zniszczenia będą mniejsze, nie stanowią one absolutnego zabezpieczenia. Trzęsienie ziemi w roku 1989, znacznie mniejsze niż to z 1906, które nastąpiło w pobliżu Santa Gruz w Kalifornii, prawie 100 kilometrów na południe od San Francisco, uszkodziło budynki i mosty w tym miejscu i jego okolicy oraz spowodowało śmierć 65 osób. Wiele innych dużych miast na świecie stoi w obliczu zagrożeń procesami

geologicznymi; nie ulega wątpliwości, że nastąpią one w okresie od kilkudziesięciu do kilkuset lat.

Na szczęście zniszczenia powodowane trzęsieniem ziemi są dość ograniczone. Gdy zdarza się ono w morzu, może wywołać wielkie tsunami, które przemieszcza się przez całe baseny oceaniczne i niszczy nawet oddalone obszary na kuli ziemskiej. Choć owe gigantyczne fale wędrują bardzo szybko, zwykle ostrzeżenie przychodzi wystarczająco wcześniej, aby mieszkańcy zagrożonych wybrzeży mogli się przygotować, a przynajmniej opuścić nisko położone obszary. Bardzo silne erupcje wulkaniczne również powodują niekiedy konsekwencje z dala od ich bezpośredniego sąsiedztwa. Wspomniano już w *rozdziale 12*, że erupcja wulkanu Pinatubo na Filipinach w 1991 roku, z powodu aerozoli wulkanicznych - głównie dwutlenku węgla - które zostały wprowadzone do atmosfery, obniżyła na kilka lat globalną temperaturę. Bezpośrednio po początkowych erupcjach w atmosferze *znalazło* się tyle okruchów wulkanicznych, że regularne linie lotnicze na trasach pacyficznych musiały co kilka dni zmieniać w samolotach porysowane szyby. Ten sam pył był odpowiedzialny za spektakularne zachody słońca na całym świecie przez ponad rok.

Wiele erupcji z przeszłości pozostawiło w zapisie geologicznym łatwe do przesledzenia warstwy popiołów, często grubości

kilku centymetrów, na dziesiątkach tysięcy kilometrów kwadratowych. Największa w najnowszej historii erupcja wydarzyła się w 1815 roku na wyspie Sumbawa w Indonezji, gdy nastąpił gwałtowny wybuch wielkiego wulkanu Tambora. Według notatek urzędników europejskich, przebywających wówczas w tym regionie, eksplozja towarzysząca erupcji była słyszana w odległości 1500 kilometrów. Na Jawie, setki kilometrów na zachód od Tambory, popioły przemieniły dzień w noc. Pył wulkaniczny wyrzucony do atmosfery był prawie na pewno przyczyną niezwykłego zima, które zapanowało na całym globie. W czarującej, małej książeczce, traktującej o wulkanach i klimacie, Henry i Elizabeth Stommelowie dokładnie opisali zimne, wilgotne (a nawet śnieżne) lato 1816 roku w Nowej Anglii, Europie i innych miejscach, które nastąpiło po erupcji wulkanu Tambora.

Zgromadziliśmy wystarczająco dużo danych, monitorując dokładnie takie erupcje, jak wulkanu Pinatubo, że możemy stwierdzić, iż ogromne ilości popiołów i dwutlenku siarki wyrzucone przez wulkan Tambora musiały znacząco wpłynąć na ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni ziemskiej, powodując znaczne ochłodzenie. Niektórzy badacze zauważyli, że największe wydarzenia wulkaniczne widoczne w zapisie geologicznym, o sile wielokrotnie przekraczającej erupcje wulkanu Tambora, mogły powodować „wulkaniczną zimę” trwającą kilka lat. Jest zupełnie pewne, że takie erupcje będą się zdarzały w przyszłości, a ich skutki spowodują prawie takie zniszczenia, jak duże im-pakry, omawiane w poprzednim podrozdziale. Możliwe jest również, że następujące po takich zdarzeniach globalne ochłodzenie, jeśli zdarzy się w sytuacji skądinąd stosownej dla zlodowacenia, wystarczy, by wtrącić Ziemię w epokę lodową.

Geologia nie respektuje granic narodowych. Odkrywa w ziemi skarby w postaci złóż mineralnych i energetycznych, lecz również - zagrożenia. Są to dzisiejsze przejawy procesów geologicznych, które przebiegały w ciągu milionów, jeśli nie miliardów lat. Owe procesy dość radykalnie potrafią zmienić wygląd Ziemi, klimat, a nawet wpłynąć na przebieg ewolucji. Wiemy o tym wszystkim dzięki badaniom zachowanego w skałach zapisu geologicznego. Odczytując ten zapis w coraz większych szczegółach, powinniśmy nauczyć się przewidywać, co nas czeka. Być może uda się również odgadnąć, w jaki sposób człowiek - ów najmłodszy czynnik zmian na skalę globalną - zakłóca naturalne cykle geologiczne. Niewykluczone, że ku powszechnemu zadowoleniu, pozwoli to jeszcze lepiej zrozumieć, jak powstają krajobrazy, które cieszą nasze oczy każdego dnia.

## SŁOWNICZEK

**akrecja** W odniesieniu do wczesnej Ziemi - proces, dzięki któremu materia stała kraząca wokół Słońca połączyła się, aby utworzyć naszą planetę. Fragmenty materii mogły osiągać rozmiary od ziaren piasku do obiektów planetopodobnych wielkości Marsa.

**andezyt** Rodzaj skały wulkanicznej charakterystycznej dla wulkanów powstałych w strefach subdukcji. Nazwa pochodzi od łańcucha gorskiego Andów.

**Archaeopteryx** Wymarłe zwierze łączące cechy ptaków i gadów. Uważany jest za jednego z pierwszych ptaków z powodu struktury szkieletu oraz piór. *Archaeopteryx* żył u schyłku okresu jurajskiego.

**bazalt** Pospolita, drobnoziarnista, ciemna skała magmowa, powstająca w wyniku ochłodzenia lawy wulkanicznej wyrzuconej na powierzchnię (lawy są efektem przetapiania skał w płaszczu). Bazalty stanowią przeważający typ skał podłoża dna morskiego i wielu wysp oceanicznych, takich jak Hawaje; są również częste na kontynentach.

**boksyt** Typ skały powstałej w wyniku wietrzenia w klimacie gorącym; jest to główna ruda aluminium. Składa się prawie wyłącznie z wodorotlenków glinu - praktycznie wszystkie inne składniki pierwotnej skały zostały wypłukane przez obfite i ciepłe deszcze.

**chondryt** Pospolity typ meteorytów; uważa się, iż składa się z okruchów pierwotnej materii Układu Słonecznego. Sądzi się, że chondryty są fragmentami małych ciał, które nigdy nie uległy stopieniu i zroźnicowaniu chemicznemu, i z tego powodu

chondryty dostarczają ważnych wskazówek dotyczących natury pierwotnej materii, która podlegała akrecji, tworząc Ziemię.

**cyjanobakterie (sinice)** Rodzaj bakterii, znalezionych w skałach archaiku; żyją również współcześnie (dzisiejsze stromatolity są tworzone przez cyjanobakterie). Podobnie jak wszystkie bakterie są prymitywnymi (prokariotycznymi) komórkami bez zroźnicowanych struktur wewnętrznych.

**cyrkon** Szeroko rozprzestrzeniony, choć śladowy minerał skorupy ziemskiej o wzorze chemicznym  $ZrSiO_4$ . Ponieważ zawiera zwykle uran, używany jest powszechnie w datowaniu uranowo-ołowiową.

**czert** Twarda, drobnoziarnista skała osadowa zbudowana z krzemionki ( $SiO_2$ ), czasami nazywana krzemieniem. Czerty mogą powstawać poprzez bezpośrednie wytrącanie z wody lub w wyniku nagromadzenia się krzemionkowych szkieletów niektórych organizmów planktonowych.

**efekt cieplarniany** Wzrost temperatury na powierzchni Ziemi spowodowany zatrzymywaniem ciepła przez różne gazy atmosferyczne, takie jak dwutlenek węgla czy metan. Związki, które zapobiegają ponownemu wypromieniowaniu energii cieplnej z Ziemi, nazwane zostały gazami cieplarnianymi. Jest to oczywista analogia do prawdziwej szklarni, w której przezroczyste

szkło powstrzymuje wypromieniowanie ciepła na zewnątrz.

**energia kinetyczna** Energia każdego poruszającego się ciała i będąca rezultatem jego ruchu.

**erratyk (narzutniak)** Skala lub giaz przeniesiony przez lodowce daleko od miejsca jego powstania. Rozpoznać je zwykle można po tym, że są to skały innego typu niż występujące w okolicy.

**Eukaryota** Grupa organizmów zbudowanych z komórek zawierających jądro, chromosomy i inne struktury wewnętrzne (komórki eukariotyczne). Ten typ komórek jest charakterystyczny dla wszystkich organizmów, z wyjątkiem bakterii i sinic.

**ewaporaty** Chemiczne skały osadowe, zwykle składające się ze znanej nam soli kuchennej (NaCl) oraz gipsu (CaSO<sub>4</sub>), powsta-

ły w wyniku bezpośredniego wytrącania w zbiorniku wodnym poprzez parowanie.

**fotosynteza** Proces, w wyniku którego rośliny przekształcają CO<sub>2</sub> i wodę w związki organiczne, uwalniając jednocześnie tlen.

**gatunek** Jednostka taksonomiczna podrzędna w stosunku do rodzaju. Osobniki tego samego gatunku mogą się krzyżować i dawać płodne potomstwo.

**glina zwałowa** Ogólny termin opisujący nie skonsolidowany rumosz złożony przez lodowce. Glina zwałowa jest zwykle mieszaniną fragmentów o bardzo różnych rozmiarach, od bloków do mikroskopijnych cząsteczek iłu, i często także wielu różnych rodzajów skał. Glina zwałowa, która została scementowana w zwięzłą skałę, nazywana jest tillitem.

**granit** Pospolita gruboziarnista skała magmowa występująca w skorupie kontynentalnej, zwykle zbudowana ze skaleni, kwarcu i łuszczków (mika). Granit powstaje z magmy, która nie przedarła się na powierzchnię Ziemi, lecz zastygła powoli wewnątrz skorupy. Powolne stygnięcie jest przyczyną jej gruboziarnistości.

hematyt Pospolity i szeroko rozprzestrzeniony minerał żelaza o wzorze chemicznym Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Zwykle charakteryzuje się wyraźną czerwoną lub czerwono-brązową barwą.

**izotopy** Wszystkie pierwiastki chemiczne posiadające te same właściwości chemiczne, lecz różniące się między sobą liczbą neutronów w jądrze, a tym samym - masą atomową.

**jądro** Najbardziej wewnętrzna część Ziemi, leżąca pod płaszczem (ryc. 1.2). Jest zbudowane głównie ze stopu żelazo-niklowego, lecz zawiera również niektóre cięższe pierwiastki. Składa się ze stałej części wewnętrznej oraz płynnej zewnętrznej. Uważa się, że w jego zewnętrznej części powstaje ziemskie pole magnetyczne.

**kimberlit**. Specyficzny rodzaj skały wulkanicznej, dość rzadko spotykanej, lecz jednocześnie ważnej, bowiem wszystkie znane

wystąpienia diamentów. związane są z kimberlitami. Ponieważ wiele kimberlitów zawiera diamenty, musiały one powstać

w wyniku przetopienia w płaszczu na dużych głębokościach, przypuszczalnie około 200 kilometrów.

**korallowce** Duża grupa morskich bezkręgowców żyjących w płytkich wodach i budujących swoje szkielety z węglanu wapnia; często tworzą kolonie, co jest powodem powstawania raf koralowych; występują licznie w zapisie kopalnym.

**krawędź pasywna** Krawędź kontynentu znajdująca się całkowicie wewnątrz płyty tektonicznej, w wyniku czego nie występuje tam wulkanizm, sejsmiczność i inne zjawiska geologiczne charakterystyczne dla granic płyt. Zwykle wzdłuż krawędzi pasywnych spokojnie gromadzą się osady, tak jak dzisiaj wzdłuż wschodniego wybrzeża Ameryki Północnej lub zachodnich wybrzeży Afryki i Europy.

**kwarc** Pospolity minerał skorupy ziemskiej o wzorze chemicznym  $\text{SiO}_2$ -

less Droбноziarnisty osad wiatrowy, szeroko rozprzestrzeniony na całym świecie, szczególnie na półkuli północnej. Uważa się, że jego pochodzenie związane jest z epoką lodowcową ostatnich kilku milionów lat; prawdopodobnie powstał wskutek *przeważającego* wówczas suchego klimatu oraz silniejszych wiatrów atmosferycznych w szczytowych momentach okresów glacialnych.

**litosfera** Zewnętrzna, sztywna otoczka Ziemi utworzona z płyt tektonicznych. Przeciętnie ma ona miąższość 100 kilometrów; obejmuje zarówno skorupę, jak i najbardziej zewnętrzną część płaszczu. Granica pomiędzy litosferą i niżej leżącym płaszczem ma charakter fizyczny, nie chemiczny - powstaje tam, gdzie górny płaszcz jest gorący i dość plastyczny.

**lupek** Typ skały osadowej, zbudowanej przede wszystkim z droбноziarnistych minerałów ilastych. Zwykle łatwo rozpada się wzdłuż pierwotnych powierzchni warstwowania, tworząc cienkie płaskie kawałki.

**magma** Masa powstała na skutek topnienia skały wewnątrz Ziemi. Gdy magma ochładza się i krzepnie, tworzy skałę głębinową (intruzywną); jeśli wylewa się na powierzchnię, nazywana jest lawą.

**masowe wymieranie** Epizod, zwykle trwający nie więcej niż kilka milionów lat, w czasie którego tempo wymierania roślin i zwierząt jest szczególnie wysokie. Większość ważniejszych granic w geologicznej skali czasu zbiega się z masowymi wymieraniami.

**metamorfizm** Proces, dzięki któremu skład mineralny skały ulega zmianie, kiedy zostaje ona poddana działaniu wysokich temperatur i ciśnień.

**meteoryty** Skalne lub metaliczne objekty, które spadają na Ziemię z kosmosu. Uważa się, że większość pochodzi z pasa

planetoid.

mikroorganizmy Mała (mikroskopowa) forma życia. Nazwa używana przede wszystkim dla określenia bakterii.

**morena** Wzgórze lub pasmo górskie zbudowane z gliny zwałowej złożonej zwykle na krawędzi lodowca.

**morze (mare)** Nazwa nadana ciemnym, nisko położonym obszarom na Księżycu. Dziś wiadomo, że przyczyną ciemnego koloru morz jest to, że są one wypełnione lawą bazaltową ciemnego koloru.

**odslonięcie** Geolodzy opisują tym terminem część skał lub formacji skalnej widocznych na powierzchni Ziemi.

**okres półrozpadu** Termin używany na oznaczenie czasu, w którym połowa atomów jakiegoś pierwiastka promieniotwórczego ulega rozpadowi. Okres półrozpadu zależy bezpośrednio od stałej rozpadu, która stanowi prawdopodobieństwo rozpadu w jednostce czasu.

**okruchowy (detrytyczny)** Przymiotnik opisujący fragmenty skał oraz materiał mineralny wyerodowany ze skał macierzystych i przetransportowany do miejsca depozycji.

**okrytozależkowe (okrytonasienne)** Waznym elementem w ewolucji tych roślin są kwiaty przywabiające owady, które przenoszą pyłek z jednego kwiatu na drugi [umożliwiając zapylanie krzyżowe, będące podstawą zmienności w świecie roślin -przyp. red.].

**paleontologia** Nauka badająca historię życia na Ziemi, posługując się głównie skamieniałościami.

**piaskowiec** Skała osadowa, zbudowana przede wszystkim z ziarn kwarcu scementowanych ze sobą chemicznie wytrąconym spoiwem, takim jak hematyt, węgiel wapnia lub krzemionka.

**piryt** Mineral składający się z żelaza i siarki, o wzorze chemicznym  $FeS_2$ . Jest szeroko rozprzestrzeniony w skorupie ziemskiej i potocznie nazywa się go „złotem głupców”.

**pióropusz płaszcz** Strumień materiału o niższej gęstości niż otoczenie, unoszący się ku górze z głębi płaszcz. Pióropusze płaszcz są przypuszczalnie bardziej gorące od swego otoczenia i w miarę jak zbliżają się do powierzchni, ulegają stopieniu, co prowadzi w wielu wypadkach do przejawów wulkanizmu na powierzchni. Uważa się je za stacjonarne i długotrwałe. Tworzą między innymi wulkany Hawajów oraz długi łańcuch wygasłych już i pogrążonych wulkanów, ciągnący się na północny zachód od nich.

**plama gorąca** Termin opisujący powierzchniowe wybrzuszenie pióropuszy płaszcz. Plamy gorąca stanowią obszary rozległej aktywności wulkanicznej, intensywnego przepływu ciepła i są wyniesione w stosunku do otoczenia.

**planetoida** Małe (największa ma około 1000 kilometrów średnicy) kamienne lub metaliczne ciało krążące po orbicie wokół Słońca. Ich nagromadzenie występuje w pasie planetoid pomiędzy Marsem a Jowiszem. Uważa się, że większość meteoroidów pochodzi właśnie stamtąd.

**plankton** Ogólny termin oznaczający drobne rośliny i zwierzęta zawieszane w toni wodnej jezior i oceanów.

**plaszcz** Strefa Ziemi pomiędzy skorupą a jądrem (ryc. 1.2). Stanowi przeważającą część Ziemi i zbudowany jest z minerałów o dużej gęstości, przede wszystkim krzemianów i tlenków magnezu i żelaza.

**plaszczowina** Fałdy skalne, charakterystyczne dla stref kolizji

pomiędzy kontynentami. Powstają wskutek silnych nacisków występujących w takich strefach.

**plyta** W tektonice płyt w przybliżeniu sztywny fragment litosfery, przemieszczający się na powierzchni Ziemi w stosunku do innych płyt.

**Prokaryota** Organizmy składające się z prymitywnych komórek (komórka prokariotyczna), nie mających struktur wewnętrznych, takich jak chromosomy czy jądro. Wszystkie bakterie należą do *Prokaryota*.

**pterozaur** Wymarły latający gad, który żył w mezozoiku.

**radiacja** W sensie ewolucyjnym radiacja oznacza ekspansję grupy organizmów do nowych środowisk, z towarzyszącą jej dywergencją cech ewolucyjnych.

**rodzaj** Jednostka taksonomiczna wyższa od gatunku, obejmująca blisko spokrewnione gatunki.

**sejsmiczny** Odnoszący się do trzęsień ziemi lub do wibracji przez nie spowodowanych. Fala sejsmiczna, na przykład, jest ogólnym terminem opisującym wibracje przemieszczające się na zewnątrz od miejsca wystąpienia trzęsienia ziemi. Nieciągłość sejsmiczna wzdłuż uskoku stanowi jego fragment, gdzie nie występują trzęsienia ziemi.

**stekowce** Grupa prymitywnych jajorodnych ssaków, z których większość wymarła. Dziobak z Australii oraz dwa gatunki mrówkojadów z Australii i Nowej Gwinej są jedynymi żyjącymi stekowcami.

**stromatolity** Warstwowane, bulwiaste struktury występujące w skałach osadowych. Stromatolity są szczególnie częstymi skamieniałościami w skałach proterozoiku, choć ich odmiany

występują również dzisiaj. Struktury stromatolitowe powstają w wyniku wychwytywania cząstek osadu przez sinice tworzące warstewki lepkich nitek.

**subdukcja** Proces, w którym część płyty litosfery wciągana jest do wnętrza Ziemi na granicy kolizyjnej pomiędzy płytami. Zanurzająca się płyta jest niezmiennie ta, która niesie gęstą skorupę oceaniczną, a strefa subdukcji zaznacza się na powierzchni w postaci głębokich rowów oceanicznych. Dla stref subdukcji charakterystyczne są silne trzęsienia ziemi.

**supernowa** Wybuchająca gwiazda. Supernowe się pojawiają, kiedy „paliwo jądrowe” dużej gwiazdy zostaje wyczerpane; centralna część gwiazdy się kurczy, prowadząc do eksplozji o charakterze kataklizmu, połączonej z uwolnieniem ogromnych ilości energii.

**szew**. Strefa, wzdłuż której dwa fragmenty skorupy kontynentalnej połączyły się w wyniku kolizji. Początkowo takie strefy *zaznaczają* się występowaniem wysokich gór; Himalaje i Alpy są przykładem takich stosunkowo młodych stref.

**talus** Również talus zboczowy lub piargi. Oznacza nagromadzenie luźnych okruchów tworzących strome osypisko fragmentów skalnych u podstawy klifu lub stromego *zbocza* górskiego.

**trylobity** Wymarła gromada zwierząt bezkręgowych, które żyły w morzach od kambru aż do końca permu. Trylobity spokrewnione są ze skorupiakami, owadami oraz pajakami.

**uniformitaryzm** Idea, według której procesy geologiczne dziś obserwowane najprawdopodobniej przebiegały tak samo w przeszłości.

**uraninit** Mineral, tlenek uranu o *wzorze* chemicznym  $UO_2$ .

**uskok** Powierzchnia pęknięcia w skałach, wzdłuż której następuje przemieszczenie mas skalnych. Zwykle pęknięcie w skorupie ziemskiej, wzdłuż którego nastąpiło przemieszczenie.

**wapień** Skała osadowa zbudowana głównie z węglanu wapnia. Niektóre wapienie są produktem wytrącania chemicznego, lecz w większości wypadków węglan wapnia pochodzi ze szkieletów i muszli organizmów morskich, które po ich śmierci nagromadziły się na dnie.

**zlepieniec** Skała osadowa zbudowana przede wszystkim z ob-

toczonych okruchów i bloków, często różnego typu skał, zlepiionych bardziej drobnoziarnistym spoiwem. W zasadzie jest to zlityfikowany odpowiednik żwiru rzecznego.

**zlityfikowany** Utwardzony, zamieniony w twardą skałę.



