



**Wielkie wymierania, ich przyczyny i skutki –  
wnioski z międzynarodowej konferencji w Londynie,  
26–29.03.2013**

W dniach 26–29.03.2013 odbyła się w Natural History Museum w Londynie międzynarodowa konferencja zatytułowana „Volcanism, Impacts and Mass Extinctions: Causes and Effects”. Dotyczyła ona jednych z najbardziej frapujących i istotnych problemów nauki – wielkich wymierań i ich przyczyn. Warto przypomnieć, że poprzednia konferencja, dotycząca tych samych zagadnień, odbyła się 10 lat temu w Wiedniu. Była to więc także okazja do przypomnienia, jak zmieniały się poglądy na temat wielkich wymierań oraz ich przyczyn na przestrzeni ostatniej dekady, w trakcie której nastąpił ogromny postęp wiedzy.

Trzydniowa sesja referatowo-posterowa, podzielona na osiem sukcesywnych bloków, przyniosła odmienne wnioski od tych, które większość świata nauki (a za nim także świata mediów) przyjęły 10 lat temu. Wówczas najbardziej popularna była teoria impaktowa, oparta na „sztandarowym” przykładzie – jednym z tzw. Wielkiej Piątki masowych wymierań, na granicy kreda/paleogen (K/Pg). Na podstawie tak wyraźnej zdawałoby się przyczyny jednego z wielkich wymierań postulowano podobny mechanizm w przypadku przynajmniej niektórych pozostałych wielkich wymierań. Obecnie uważa się, że przyczyną wszystkich wielkich wymierań fanerozoicznych (poza ordowickim, którego przyczyny nie są do końca znane) była aktywność wielkich prowincji wulkanicznych (LIPs – *Large Igneous Provinces*). Referaty dotyczyły zarówno badań aktualistycznych (np. wulkanologicznych), jak i zapisu geologicznego. Obecni na konferencji wulkanolodzy przedstawili mechanizmy wpływu wielkich erupcji na system oceaniczny i atmosferyczny. Teoria impaktowa, która przeważała jeszcze 10 lat temu, wydaje się być w odwrocie. Paradoksalnie jednak na uwagę zasługują nowe dane astronomiczne, pozwalające na podtrzymanie hipotezy o wpływie nie tyle upadków asteroid, ile raczej seryjnych impaktów obiektów lodowych (tzw. centaurów, zmieniających się w pobliżu Słońca w komety). Impakty takich obiektów są bardzo trudne do wykrycia za pomocą metod geochemicznych, pozostaje tylko krater – struktura często ulegająca zatarciu, zwłaszcza jeśli była położona na skorupie oceanicznej, ulegającej niszczeniu w procesach kolizji płyt litosfery, np. subdukcji. Liczba tych lodowych obiektów w obrębie tzw. Pasa Kuipera, ich trajektorie i rozmiary pozostają wciąż mało znane. Jest prawdopodobne, że przypadkowe zaburzenia orbit lodowych gigantów (> 100 km średnicy) mogły je wprowadzać na orbity o peryhelium mniejszym od jednostki astronomicznej (średnia odległość Słońce–Ziemia). Obiekty takie ulegałyby dezintegracji na liczne mniejsze, ale ich wspólna orbita mogła pozostawać stała przez setki tysięcy, podnosząc wydatnie prawdopodobieństwo seryjnych impaktów na Ziemi. Pozostaje jeszcze śmiała hipoteza (dotyczył jej jeden z referatów), że wielkie „plamy gorąca”, pióropusze magmowe i

związane z nimi LIPs mogą być genezy... impaktowej (dokładniej, wyjątkowo wielkich impaktów). Pogląd ten, aczkolwiek frapujący, pozostaje jedynie domysłem, gdyż jak do tej pory nie znaleziono na taki mechanizm wystarczająco pewnych dowodów.

Przeważająca część referatów dotyczyła wielkich prowincji wulkanicznych, a także modeli oddziaływania takich prowincji na atmosferę, hydrosferę i klimat. W szczególności są to modele oparte na analizie powstawania i rozprzestrzeniania się aerozoli (np. model GLOMAP). Modele te są oparte na analizie aktywności współczesnych lub niedawnych (na szczęście znacznie mniejszych) wulkanów – np. erupcji islandzkiego wulkanu Laki (w latach 1783–1784). Erupcja tego wulkanu była zjawiskiem znikomym w porównaniu z wielkimi prowincjami wulkanicznymi, dostarczyła do atmosfery ziemskiej ok. 120 mln ton dwutlenku siarki w czasie 8 miesięcy. Wystarczyło to jednak do znacznego, globalnego ochłodzenia i wywołania trwającego kilka kolejnych lat nieurodzaju w Europie, a w efekcie głodu. Powszechnie upatruje się w tych zjawiskach jednej z przyczyn Wielkiej Rewolucji Francuskiej (1789–1799). Coraz dokładniejsze datowania wylewów bazaltowych wielkich prowincji wulkanicznych w przeszłości geologicznej wskazują, że procesy te trwały zwykle około miliona, niekiedy 2–3 mln lat (z przerwami), co przekładało się na olbrzymią masę w granicach  $1,5\text{--}3 \times 10^{16}$  kg magmy! Czynnikiem oddziaływującym na ekosystemy w skali globalnej były natomiast składniki lotne – przede wszystkim te trujące, związane z siarką, chlorem, fluorem oraz wielopierścieniowe związki aromatyczne, a także gazy nietoksyczne, ale zmieniające klimat (para wodna,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ).

W wielu referatach podnoszono też kwestię nie tylko gwałtowności zjawisk wywierających wpływ na ekosystem, ale także czas ich oddziaływania. Pojedynczy, nawet wielki impakt o oddziaływaniu globalnym wywiera swoje dewastujące efekty krótko. Kryterium odpowiedniej długości oddziaływania na ekosystemy spełniają natomiast LIPs.

Każde z pięciu wielkich wymierań fanerozoiku (pominięto słabiej udokumentowane wymierania kambryjskie) zostało omówione w ramach odrębnych sesji.

**WYMIERANIE U SCHYŁKU ORDOWIKU  
(OK. 444–446 MLN LAT TEMU)**

Wymarło wówczas 20% rodzin i 40% rodzajów organizmów morskich (jest oczywiste, że nie sposób w tym czasie określić wymierania wśród bardzo wówczas ubogiego świata organicznego lądów). Należy też pamiętać, że skala tego i wszystkich następnych wymierań opiera się na materiale kopalnym (obejmując tylko te znane organizmy, które pozostawiły po sobie skamieniałości), a jest pewne, że to

tylko część dawnego świata organicznego. Wymieranie ordowickie przebiegało w dwóch fazach, obie były powiązane ze zlodowaceniami kontynentalnymi wokół bieguna południowego. Pierwsza faza nastąpiła z początkiem piętra hirnant i w szczególności dotknęła organizmy bentoniczne zarówno w płytkich, jak i głębszych wodach, co ciekawe, w mniejszym stopniu te żyjące w strefach pośrednich. Ponadto, wymarło wiele grup zooplanktonu (szczególnie wśród graptolitów) i organizmów nektonicznych. Zaburzenia systemów izotopowych siarki i węgla wskazują na podniesione tempo sekwestracji węgla organicznego i siarki w postaci piryty, co było spowodowane eutrofizacją ówczesnych oceanów i zmianami głębokości halokliny. Drugi impuls wymierania nastąpił w środkowym hirmancie i był mniej selektywny, eliminując w szerokim spektrum środowiskowym organizmy, które przetrwały pierwsze stadium. Wyraźny wydaje się być zalew płytkich stref szelfowych przez niedotlenione wody, co musiało mieć dewastujący efekt na silnie zróżnicowane zespoły płytkomorskich organizmów. Wynika to z dużych wahań poziomu morza ze zlodowaceniami, którym z kolei sprzyjała koncentracja mas lądowych wokół bieguna południowego. Wymieranie to zwolniło nisze ekologiczne i poprzez następujące po nim wyzwolenie ewolucyjne ukształtowało obraz bioróżnorodności, który w zasadniczych swoich zarysach trwał aż do końca ery paleozoicznej.

#### **WYMIERANIE W PÓŹNYM DEWONIE (OK. 374–377 MLN LAT TEMU)**

Wymieranie to bywa wciąż różnie definiowane – aby odpowiadało kryterium dopuszczalnej krótkotrwałości, za jego czas przyjmuje się okolice granicy fran/famen i czas około 3 milionów lat. Inni badacze uważają wymieranie późnodewońskie za wielofazowy proces trwający kilkanaście, a nawet ponad 20 mln lat. Dlatego to wymieranie jest wciąż trudne do jednoznacznego zdefiniowania i być może mamy do czynienia bardziej z kryzysem specjacji, niż klasycznym, gwałtownym wymieraniem. Przyjmując przeważający obecnie pogląd, wymieranie dotyczyło późnego franu i początku famenu. Byłoby ono dwustopniowe, z zaznaczającymi się dwoma szeroko rozprzestrzenionymi wydarzeniami anoksycznymi w oceanach: „dolny Kellwasser” (strop franu) i „górny Kellwasser” (granica fran/famen). Przy tak zdefiniowanych wydarzeniach, wymieranie późnodewońskie dotknęło ok. 20% rodzin i 60% rodzajów organizmów morskich, co czyni je porównywalnym z poprzednim, ordowickim. Kryzys tlenowy i eutrofizacja ogarnęły wówczas strefę fotyczną mórz z zabójczym efektem (zwłaszcza dla koralowo-stromatoporoidowo-mszywiolowych ekosystemów rafotwórczych), zaznaczyła się też silna depozycja (sekwestracja) węgla organicznego skutkująca zaburzeniami cyklu węglowego i przejściowymi, gwałtownymi zmianami klimatycznymi (w tym silnymi ochłodzeniami) oraz zmianami poziomu morza. Eutrofizacja, anoksja i zmiany klimatyczne uważane są za bezpośrednie przyczyny kryzysu. Co ciekawe, zróżnicowany już wtedy świat roślinny nie został dotknięty kryzysem. Przyczyny pośrednie wymierania nie są do końca jasne – trapy bazaltowe Wilnuy we wschodniej Syberii (360,3–370 mln lat temu, szacowana objętość – ok. 300 000 km<sup>3</sup> bazaltów) wskazują na silny

magmatyzm i mogą być brane pod uwagę jako potencjalna przyczyna. Brak jest natomiast przekonujących dowodów (wskazówek geochemicznych, kwarców szokowych, mikrotektytów) na to, że taką przyczyną był impakt. Znany krater Siljan w Szwecji (65–75 km średnicy) jest nieco starszy od początku wymierania i mógłby teoretycznie być rozważany jako przyczyna, jednak jest to struktura pojedyncza i zbyt mała na wyjaśnienie globalnych zmian. Natomiast przy wydarzeniach późnodewońskich należy wspomnieć o kończącym ten okres wydarzeniu anoksycznym Hangenberg (strop famenu). Wydarzenie to przyniosło także wymieranie kręgowców, zarówno morskich, jak i lądowych.

#### **WYMIERANIE U SCHYŁKU PERMU (OK. 260–252 MLN LAT TEMU – DWIE FAZY)**

Największe wymieranie w dziejach Ziemi wyeliminowało ok. 60% rodzin i aż 80% rodzajów organizmów morskich. Na lądach wyginęło ok. 77% grup zwierząt lądowych (choć świat roślin został dotknięty w niewielkim stopniu), sumarycznie wyłania się katastrofalny obraz – z Ziemi na zawsze zniknęło ponad 90% gatunków!

Wymieranie przebiegało w dwóch fazach: pierwsza, słabsza, pod koniec kapitanianu (ok. 260 mln lat temu) i druga, zasadnicza, pod koniec okresu permskiego, u schyłku czangsingianu (ok. 252 mln lat temu). W obu przypadkach zaznacza się zaburzenie systemów izotopowych węgla i tlenu. Z końcem permu nastąpił ponadto kryzys pierwotnej produktywności organicznej w oceanach, raptowny wzrost temperatury i anoksja w oceanach. Jakkolwiek próbowano szukać różnych przyczyn, np. upadku wielkiego obiektu pozaziemskiego, jedyny przekonujący łańcuch zdarzeń łączy wymieranie późnego permu z wielkimi trapami wulkanicznymi Syberii. Erupcje te są szacowane na 2 do 3 mln km<sup>3</sup> bazaltów, które dziś jeszcze zajmują powierzchnię prawie 4 mln km<sup>2</sup> (ponad dziesięciokrotny obszar Polski), a ich miąższość wynosi 400 do 3000 m. Ale nawet taka skala erupcji nie uwolniłaby wystarczającej ilości lotnych substancji, zdolnych wywołać tak dramatyczny kryzys w ekosferze. Za czynnik wzmacniający zabójcze działanie mega wulkanów uznaje się termiczny metamorfizm skał, w które intrudowała lava bazaltowa: były to zarówno formacje węglowe, jak i utwory ewaporatowo-węglanowe zawierające węglowodory. W efekcie przemian termicznych zostały uwolnione do atmosfery dodatkowe gigantyczne ilości tlenków węgla, policyklicznych węglowodorów aromatycznych, a także związków siarki, chloru i fluoru. To, wraz z niskim wówczas globalnym poziomem morza (wąskimi strefami szelfów) i kontynentalnym, suchym klimatem, mogło wystarczyć do spowodowania tak wielkiego wymierania.

#### **WYMIERANIE U SCHYŁKU TRIASU (OK. 201 MLN LAT TEMU)**

To niegdyś najmniej znane z wielkich wymierań stało się obecnie jednym z najlepiej udokumentowanych, zarówno co do czasu, jak i przyczyn oraz skutków. Nie ulega obecnie wątpliwości, że wiąże się ono z erupcjami bazaltowymi wielkiej prowincji magmatycznej Centralnego Atlantyku. Była ona największa pod względem obszaru w

całym fanerozoiku (ponad 10 mln km<sup>2</sup> obejmujące rozległe obszary północnej części Ameryki Południowej, wschodnią część Ameryki Północnej, północno-zachodnią Afrykę, półwysep Iberyjski i tereny dzisiejszej Bretonii) i jedna z dwóch największych (obok permskich trapów syberyjskich) pod względem objętości magmy (2–3 mln km<sup>3</sup>). Jej powstanie wiąże się z początkiem rozpadu superkontynentu Pangea. Aktywność wulkaniczna obejmująca przełom triasu i jury trwała niecały milion lat, z nasileniami i przerwami. Datowania skał wulkanicznych po obu stronach Atlantyku pozwoliły na precyzyjne umiejscowienie w czasie początku wielkich erupcji, który pokrywa się prawie dokładnie z dużym, choć krótkotrwałym, zaburzeniem cyklu węglowego, za co odpowiadają zarówno lotne produkty wulkanów, jak i dysocjacja hydratów metanu z den oceanicznych. Wiązało się to ze wzrostem temperatury i zmianą cyrkulacji oceanicznej. Zjawiska te powodowały zakwaszenie oceanów i kryzys organizmów tworzących szkielety węglanowe, zwłaszcza tych rafotwórczych. Zanik raf i innych organizmów płytkomorskich był spotęgowany ponadto niskim poziomem oceanu światowego i wąskim biotopem ich występowania. Wymieranie dotknęło także ważnych grup planktonicznych (np. radiolarij), małżów i głowonogów, konodonty zniknęły z zapisu kopalnego na zawsze. Te wydarzenia rozpoczęły wiązany z wymieraniem cykl zaburzeń ekosfery, trwający kilkaset tysięcy lat, aż do końca okresu triasowego. Wysokorozdzielcze badania profili kontynentalnych ujawniają, że okres zaburzeń w ekosferze nie był związany tylko z efektem cieplarnianym – okresy gorące i wilgotne przeplatały się z raptownymi ochłodzeniami i epizodami suchymi i właśnie ta „huśtawka” klimatyczna była prawdopodobnie przyczyną kryzysu, zwłaszcza w przypadku ekosystemów lądowych. Przyczyną ochłodzeń mogły być z kolei emisje dużych ilości dwutlenku siarki i siarkowodoru, co wynikało najprawdopodobniej z kontaktu magmy ze skałami siarczanowymi, być może też zmian chemizmu samej magmy. W efekcie zniknęło lub uległo silnej redukcji wiele grup kręgowców, np. gady ssakokształtne i wiele grup archozaurów. Zmiany te zwolniły nisze ekologiczne dla dinozaurów, które z początkiem jury rozpoczęły podbój świata, mający trwać aż do końca okresu kredowego. Wymieranie grup roślinnych nie było tak wyraźne, przynajmniej w wielu regionach świata. Na tempo i skalę wymierania (szczególnie w przypadku roślin) znaczny wpływ mogła mieć szerokość geograficzna, co oznaczałoby jego nierównomierność w skali globalnej. Przyjmuje się, że z końcem triasu zniknęło ponad 50% rodzajów, zarówno morskich, jak i lądowych.

#### WYMIERANIE NA GRANICY KREDA/PALEOGEN (66 MLN LAT TEMU)

Najśłynniejsze, przynajmniej w wyobraźni masowej (tego też dotyczył jeden z referatów), jest wymieranie na granicy kreda/paleogen, kiedy z powierzchni Ziemi zniknęły między innymi dinozaury, pterozaurowie, ichtiozaury, płożaury, amonity, belemnity, wiele gatunków otwornic planktonicznych i wiele innych grup zwierząt. Zostało ono w ostatnich latach poddane wnikliwej weryfikacji – jemu też poświęcono najwięcej referatów podczas konferencji.

Temu ostatniemu z wielkich wymierań powszechnie przypisywano do tej pory głównie przyczynę astronomiczną, gdyż istniały niepodważalne dowody impaktu na granicy zdefiniowanej jako K/Pg – wielki krater w Meksyku (Chixculub), wskaźniki geochemiczne (w tym warstwa wzbogacona w iryd) czy poziom sferuli impaktowych w obrębie granicznych utworów K/Pg. Wyniki weryfikacji przeprowadzonej w wielu dokładnych opracowaniach są jednoznaczne: impakt Chixculub miał swój wpływ na procesy globalne, ale był to wpływ co najwyżej dodatkowy. Wysokorozdzielcze badania wykazały, że impakt nie był synchroniczny z wymieraniem ani go nie zainicjował – w przypadku większości grup zwierzęcych (w tym zwłaszcza dinozaurów, ale także np. wielu otwornic planktonicznych) znalazły się one w głębokim kryzysie i wymarły jeszcze przed kosmicznym zderzeniem, kryzys trwał także przynajmniej milion lat po kosmicznym zderzeniu, co zaprzecza związkowi przyczynowo-skutkowemu tych wydarzeń. Zaprzeczono także synchroniczności innych zjawisk: np. rzekomy tsunami to zwyczajny tempestat, w dodatku umiejscowiony w oddaleniu od granicy. Warstwy ze sferulami impaktowymi nie są izochroniczne, niektóre z nich są starsze od samego impaktu i granicy K/Pg o około 150 000 lat, wiele z nich to efekt redepozycji. Natomiast intensywny wulkanizm, którego efektem są słynne trapy Dekanu, znacznie lepiej wpisuje się w scenariusz poszczególnych faz wymierania w pobliżu granicy K/Pg. Co więcej, udało się powiązać fazy tych wylewów z fazami wymierań. Faz takich było trzy, pierwsza to ok. 6%, druga (najsilniejsza) to 80%, a trzecia 14% ogólnej objętości bazaltów Dekanu. Największe wymieranie wiąże się z drugą fazą (granica K/Pg znajduje się w jej stropie), faza trzecia opóźniła odrodzenie ewolucyjne na początku paleogenu. We wszystkich fazach występowały poszczególne „pulsy” gigantycznych wylewów (każdy z nich o objętości ponad 10 000 km<sup>3</sup> i zasięgu lateralnym do 1500 km). Szacuje się, że każdy z tych pulsów był porównywalny pod względem wyeksponowanych do atmosfery lotnych składników z całym efektem impaktu Chixculub! Tak więc i to wymieranie było przede wszystkim powiązane z plamą gorącą i LIP, przy udziale anoksji w oceanach, zmian klimatycznych i znacznych wahań poziomu morza. Obecnie przyjmuje się, że impakt mógł odegrać rolę „ciosu łaski” dla bardzo już wtedy osłabionych ekosystemów kredowych.

#### PODSUMOWANIE

Podsumowując, nowe dane uzyskane w ciągu ostatnich 10 lat silnie powiązały wszystkie wielkie wymierania z rozwojem wielkich prowincji wulkanicznych (LIPs). Warto zauważyć, że niektóre z nieco tylko mniejszych wymierań (choćby jak to w późnym pliensbachu–wczesnym toarku) też „mają w tle” wielką prowincję wulkaniczną (w tym przypadku Karoo-Ferrar). Zasadniczym wnioskiem jest to, iż do szczególnie wielkich katastrof potrzebny jest spłot kilku czynników – obecność lotnych, toksycznych składników w atmosferze, gazy cieplarniane, anoksja, zakwaszenie wód, wahania klimatyczne, wreszcie również impakt (jak dotąd, w jednym udokumentowanym przypadku) lub znacznie bardziej zabójczy, aczkolwiek wciąż tylko teoretyczny „deszcz kometarny”. Aby załamanie ekosystemów

dało w efekcie wyraźny efekt w zapisie kopalnym, potrzebny jest też nieco dłuższy cykl oddziaływania tych procesów – a więc setki tysięcy do pojedynczych milionów lat. Wszystkie wielkie wymierania mają też charakter wielofazowy, niekiedy rozciągnięty na kilka milionów lat (schyłek dewonu i schyłek permu).

Jakie aspekty wymierań będą przyciągały uwagę badaczy w najbliższych latach? Należy sądzić, że dalsze wielodyscyplinarne i wysokorozdzielcze badania kluczowych profili, modelowanie procesów wulkanicznych, badania paleoklimatyczne i paleoceanograficzne, wreszcie bodaj najslabiej poznane procesy – reakcje poszczególnych grup roślinnych i zwierzęcych na czynniki stresogenne, rozpatrywane w podejściu populacyjnym, ekosystemowym. Wciąż mało wiemy np. o zależnościach koewolucyjnych w materiale kopalnym, których znaczenie było ogromnie istotne zarówno przy wymieraniach, jak i następujących po nich odrodzeniach ewolucyjnych. Pozostaje wreszcie kwestia: czy czasy, w których żyjemy, są okresem kolejnego wielkiego wymierania – tym razem za przyczyną człowieka?

Plonem konferencji jest tom streszczeń referatów pod redakcją Gerty Keller, Andrew Kerna i Normana MacLeoda – dostępny w bibliotece PIG-PIB i pod adresem: [massextinction.princeton.edu](http://massextinction.princeton.edu). W pierwszej połowie 2014 r. zostanie natomiast wydana książka w ramach serii wydawniczej Geological Society of America Special Papers pod redakcją Gerty Keller i Andrew Kerna, zawierająca obszerne publikacje, będące rozwinięciem wybranych zagadnień prezentowanych na konferencji.

#### LITERATURA REKOMENDOWANA

- KELLER G. & KERR A. 2014 (red.) – Volcanism, Impacts and Mass Extinctions: Causes and Effects. G.S.A Special Papers (w druku).  
KELLER G., KERR A. & MACLEOD N. 2013 (red.) – Volcanism, Impacts and Mass Extinctions: Causes and Effects – Abstracts. International Conference, March 27–29, 2013, The Natural History Museum, London; s. 97 ([massextinction.princeton.edu](http://massextinction.princeton.edu)).  
MACLEOD N. 2013 – The Great Extinctions: What Causes Them and How They Shape Life. London, The Natural History Museum, s. 208.

*Grzegorz Pieńkowski*