

WACŁAW M. ZUBEREK\*

## **Przewidywanie geologicznych zagrożeń i katastrof naturalnych – ograniczenia i pewne możliwości**

### **Wprowadzenie**

Rozwój współczesnych technik pomiarowych i detekcyjnych stwarza w naukach o Ziemi olbrzymie możliwości obserwacji i monitoringu zjawisk i procesów w różnej skali (globalnej, regionalnej i lokalnej), które mogą wywoływać duże skutki społeczne. Stąd też znajdujemy się w takim okresie rozwoju cywilizacji, w którym rozbudzone są duże nadzieje społeczeństwa, polityków i decydentów co do możliwości nauk o Ziemi dostarczania odpowiednio trafnych i wyprzedzających prognoz procesów lub zjawisk. Wówczas właściwie podjęte decyzje pozwolą uniknąć lub zminimalizować negatywne skutki ich oddziaływań, ewentualnie pozwolą te zjawiska kontrolować, czyli wpływać na ich przebieg.

Prognozę w sensie ogólnym można zdefiniować jako wyprzedzającą w czasie (z pewnym krokiem czasowym) ocenę zachowania się złożonego systemu (jakim może być np. Ziemia wraz z otoczeniem) w oparciu o zarejestrowany wcześniej i obserwowany bieżąco stan systemu. W każdym indywidualnym przypadku należy jednak taką prognozę doprecyzować i uszczegółwić. W rozwiniętym i nowoczesnym społeczeństwie prognozy są szeroko wykorzystywane dla różnych celów, w tym także dla podejmowania decyzji pozwalających zminimalizować lub znacznie ograniczyć ujemne skutki oddziaływania człowieka na środowisko lub ujemne wpływy oddziaływania środowiska przyrodniczego na człowieka (np. katastrofy naturalne). Pod pojęciem katastrofy naturalnej należy rozumieć każdą nieoczekiwaną i niepożądaną zmianę w środowisku, która ma negatywny wpływ na człowieka i obiekty istniejące lub znajdujące się w budowie. Właśnie w przypadku katastrof

---

\* Prof. dr hab. inż., Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Sosnowiec; Komitet Planety Ziemi przy Wydziale VII PAN, Warszawa; e-mail: [zuberek@us.edu.pl](mailto:zuberek@us.edu.pl)

naturalnych często trudno jest określić związek między przyczynami je wywołującymi a niszczącymi skutkami, co oczywiście znacznie utrudnia ich prognozę.

Zagadnienie prognozy katastrof naturalnych w sensie formalnym i praktycznym stanowi jedno z najtrudniejszych zadań i wyzwań dla geofizyki i nauk o Ziemi. Pozostawia także najwięcej niespełnionych oczekiwań i nadziei. Wystarczy jednak uzmysłwić sobie, jak ogromne i stale narastające zagrożenie dla naszej cywilizacji stanowią takie katastrofy naturalne, jak:

- trzęsienia Ziemi,
- wybuchy wulkanów,
- osuwiska,
- huragany,
- powodzie,
- zmiany klimatu,
- coraz częściej analizowane możliwości uderzenia asteroidu.

aby zrozumieć, jak duże znaczenie mają badania i obserwacje tych zjawisk, a w szczególności możliwości ich prognozy oraz oceny ewentualnych skutków. Jednocześnie trzeba stwierdzić, że pomimo tego, iż człowiek od dawna usiłował przewidywać różne zjawiska i procesy, to na ogół rzadko okazywało się, że formowane prognozy były trafne i w pełni wiarygodne. Dlatego warto przeanalizować zarówno ograniczenia, jak i pewne możliwości przewidywania geologicznych katastrof naturalnych.

## 1. Procesy i zjawiska fizyczne

Wszystkie występujące w przyrodzie procesy i zjawiska fizyczne można umownie podzielić na dwie bardzo szerokie grupy, które jednocześnie stanowią dwa główne rodzaje ograniczeń wynikających z możliwości poznania i kontrolowania tych zjawisk, a mianowicie:

- deterministyczne,
- losowe.

Przez zjawiska i procesy deterministyczne rozumiemy te, które są na tyle poznane, że można je opisać za pomocą ścisłych reguł, najczęściej odpowiednich zależności matematycznych i których przebieg można zwykle dokładnie określić oraz przewidzieć. Zjawiska losowe to takie, których przebiegu nie można opisać i przewidzieć w dokładny sposób i których opis prowadzić można jedynie metodami rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Jednak podział ten jest umowny i względny, gdyż:

- zjawisko lub proces, który dziś uważamy za losowy, po odpowiednim poznaniu i rozwoju wiedzy, może się okazać, że jest opisywalne w sposób ścisły,
- często zjawisko (lub proces) zawiera pewien składnik zdeterminowany, na który nakłada się składnik losowy, czyli występuje nałożenie się obu typów zjawisk.

Procesy i zjawiska deterministyczne można podzielić dalej (Bendat, Piersol 1991) na okresowe i nieokresowe. Z kolei zjawiska nieokresowe można dalej podzielić na quasi-

okresowe (nałożenie przebiegów harmonicznycch o niezwiązanych ze sobą okresach) oraz zjawiska przejściowe, czyli procesy (lub zjawiska) dokładnie opisane analitycznie, ale nie wykazujące żadnej okresowości w ich występowaniu. W przypadku procesów deterministycznych dla każdego momentu czasu lub w każdym punkcie przestrzeni można, z odpowiednią dokładnością, wyznaczyć wielkość zmiennej lub zmiennych opisujących przebieg zjawiska.

Z kolei całą szeroką grupę procesów i zjawisk losowych można podzielić na tzw. procesy punktowe (w których identyfikowane jest tylko wystąpienie zjawiska w przestrzeni lub w czasie, szeregi czasowe (przedstawiające wartość zmiennej losowej w ustalonych interwałach czasu) oraz procesy stochastyczne opisujące przebieg zmiennej losowej w sposób ciągły lub dyskretny (Zuberek 2002).

W przypadku procesów losowych dokładne określenie dowolnej wartości procesu jest niemożliwe. Posługujemy się w tym przypadku metodami statystyki matematycznej i teorii prawdopodobieństwa, wyznaczając odpowiednie momenty rozkładów, jak wartość oczekiwana, wariancje, momenty korelacyjne oraz rozkłady prawdopodobieństwa odpowiednich wartości. Jeśli momenty rozkładu procesu nie zależą od czasu, to proces nazywamy procesem stacjonarnym, jeśli zaś zmieniają się wraz z upływem czasu, to proces ten nazywamy procesem niestacjonarnym.. Specjalną klasę procesów niestacjonarnych stanowią zjawiska krótkotrwałe o wyraźnie zaznaczonym początku i końcu, nazywane procesami przejściowymi losowymi.

W przypadku nałożenia się zjawiska deterministycznego na proces losowy (np. zapis wstrząsu na tle mikrosejsmów), zależnie od tego, która część przeważa, stosujemy do opisu metody typowe dla zjawisk deterministycznych lub procesów losowych, względnie staramy się wydzielić część deterministyczną (np. badany sygnał) z procesu o charakterze losowym (np. z szumu).

## 2. Prognozowanie procesów i zjawisk

Możliwości i trafność przewidywania procesów i zjawisk zawsze są zależne od szczegółowej definicji prognozy i aktualnego stanu wiedzy, ale w przypadku procesów i zjawisk deterministycznych, dzięki ich szczegółowemu opisowi za pomocą odpowiednich zależności funkcyjnych lub równań różniczkowych, na ogół łatwiejsze jest przewidywanie zachowania się systemu w przestrzeni i w czasie, a ograniczenia prognozy można sprowadzić do (Zuberek 2002):

- niepewności w określeniu warunków początkowych, które mogą wpływać na zachowanie się (przebieg) systemu w kolejnych momentach czasu. W tym sensie może okazać się utrudnione przewidywanie zachowania się tych systemów, które są bardzo czułe ma nieznaczne zmiany warunków początkowych;
- zmienności zachowania się systemów, które nie są dobrze określone przez warunki brzegowe, albo w których warunki brzegowe ulegają zmianom w czasie;

- niejednorodności ośrodka, które w przypadku skał często zależą od skali procesu (tzw. efekt skali). Wówczas reakcja systemu nie jest całkowicie zdeterminowana procesami zachodzącymi lokalnie lub w skali mikro.

Pomimo tego, że w przypadku procesów losowych nie można określić dokładnie chwilowej wartości procesu, to jednak znając rozkład statystyczny możemy określić przedział zmienności parametru i prawdopodobieństwo, że mierzona wartość wystąpi w określonym przedziale. Z punktu widzenia katastrof naturalnych szczególnie istotne są tzw. zjawiska ekstremalne, czyli rzadkie w sensie rozkładu statystycznego w danym miejscu, określone tzw. ogonami rozkładu statystycznego z prawdopodobieństwem mniejszym od 10% lub większym od 90%.

Jeśli wartości procesu losowego są ze sobą skorelowane, tzn. wartości w przyszłości zależą od wartości bieżących i wartości w przeszłości, można z pewnym wyprzedzeniem i z pewnym prawdopodobieństwem (zależnym od wielkości zjawisk korelacyjnych) przewidywać przebieg procesu lub zjawiska.

Jeśli jednak definicja prognozy zawiera (między innymi) czas wystąpienia zjawiska, to w przypadku zjawisk deterministycznych jest to możliwe tylko dla zjawisk okresowych, czyli takich, które pojawiają się w wyraźnych cyklach (okresach), a w przypadku zjawisk losowych może się to okazać w ogóle niemożliwe. Prognozowanie zjawisk nieokresowych jest możliwe tylko w przypadku występowania jasno zdefiniowanych i w pełni wykrywalnych oznak poprzedzających (zwiastunów, prekursorów), które powinny mieć logiczne związki przyczynowe z samym przewidywanym występowaniem zjawiska (model procesu).

Prekursorem, w ścisłym znaczeniu, zjawiska jest pewna anomalna oznaka (cecha), która zawsze się pojawia przed wystąpieniem każdego prognozowanego zjawiska w sposób logiczny i uzasadniony (Kanamori 2003). Bardzo często jednak określamy pod tym pojęciem pewne anomalne zmiany występujące tylko przed niektórymi zjawiskami (np. najsilniejszymi) i których wystąpienie nie zawsze wiąże się jednoznacznie z wystąpieniem zjawiska, co w naturalny sposób znacznie utrudnia prognozę.

W przypadku zagrożeń i katastrof naturalnych należy jednoznacznie odróżnić prognozę od podejmowanych decyzji, gdyż odpowiednia i trafna prognoza powinna ułatwić i ukierunkować reakcję na nadchodzące zagrożenie, a właściwie podjęte decyzje mogą złagodzić skutki nawet błędnych prognoz. I odwrotnie, błędne wykorzystanie prognozy (niewłaściwe decyzje) może zmarnować przeznaczone na badania środki i podważyć zaufanie społeczne do nauki i ośrodków decyzyjnych.

Skuteczność odbioru prognozy zależy w dużej mierze od sposobu jej przedstawiania i od samej definicji prognozy. Należy przy tym odróżnić prognozy naukowe od prognoz użytkowych, specjalnie przygotowywanych na użytek odbiorcy. Naukowa prognoza zjawiska często musi być formułowana w sposób ścisły i nie zawsze jest w pełni zrozumiała, co w dużej mierze ogranicza możliwości jej właściwego odbioru. Przy zbyt rygorystycznie zdefiniowanej prognozie może się okazać, że zgodnie z aktualnym stanem wiedzy, nie można jej sformułować lub jej niepewność jest na tyle duża, że budzi znaczne wątpliwości w odbiorze. Może się zatem okazać, że dla celów użytkowych konieczne jest pewne

złagodzenie definicji lub jej zredefiniowanie przy pełnym zrozumieniu wszystkich ograniczeń, wynikających z nowej poszerzonej (lub zmienionej) definicji prognozy, którą można wówczas nazwać użytkową.

### 3. Przewidywanie geologicznych zagrożeń i katastrof naturalnych

Do najczęściej spotykanych geologicznych zagrożeń naturalnych zaliczyć należy trzęsienia Ziemi, erupcje wulkaniczne, osuwiska i ruchy masowe.

#### 3.1. Trzęsienia Ziemi

Najsilniejsze trzęsienia Ziemi stanowią najbardziej przerażające i niszczące katastrofy naturalne, które stanowią nawet 60% wypadków śmiertelnych związanych z zagrożeniami naturalnymi, a straty ekonomiczne przez nie wywołane stale rosną (Giardini i in. 2003).

Trzęsienia Ziemi są wynikiem ciągłej ewolucji i deformacji skorupy Ziemi i jej wnętrza na skutek zachodzących procesów tektonicznych. Pomimo tego że szerokie badania sejsmologiczne pozwoliły dość dokładnie poznać i zidentyfikować mechanizm trzęsień Ziemi, a badania nad ich przewidywaniem mają już ponad stuletnią historię, to jednak do dzisiaj nie można stwierdzić, że przewidywanie trzęsień Ziemi w sensie naukowym jest możliwe.

Przyjęło się w sejsmologii, że prognoza deterministyczna trzęsienia Ziemi musi zawierać jednoczesną ocenę (z odpowiednimi przedziałami ufności) miejsca epicentrum (lub hypocentrum), wielkości trzęsienia Ziemi (magnitudę lub energię sejsmiczną lub skalarny moment sejsmiczny) i czasu wstrząsu w ognisku. W sensie probabilistycznym można taką prognozę zdefiniować jako prawdopodobieństwo wystąpienia trzęsienia Ziemi w obszarze o zdefiniowanych granicach w pewnym przedziale wielkości, np. skalarnego momentu sejsmicznego w określonym interwale czasu. Jeśli przyjąć, że jest to prognoza trzęsienia Ziemi zdefiniowana jako naukowa, to trzeba podkreślić, że w oparciu o aktualny stan wiedzy takiej prognozy nie można w wiarygodny sposób sformułować. Nie oznacza to, że nie udało się dotychczas przewidzieć niektórych trzęsień Ziemi, gdyż kilka trafnych prognoz można znaleźć w literaturze, z których najbardziej znane to trzęsienie Ziemi w Haiceng w 1975 roku ( $M_L$ , 7,2). Na 12 godzin przed trzęsieniem Ziemi ewakuowano około 70 000 osób z miasta, które zostało zniszczone w około 90% (podaje się, że zginęło jedynie 1328 osób, a 16 980 zostało rannych). Jednakże już w 1976 r. wystąpiło także w Chinach nieprzewidziane trzęsienie Ziemi Tangszan ( $M$  8,0), które pochłonęło około 255 000 ofiar (a być może więcej), a przypadki nieprzewidzianych trzęsień Ziemi są znacznie liczniejsze.

Stwierdzono także szereg oznak w polach geofizycznych, hydrogeologicznych i geochemicznych poprzedzających różne trzęsienia Ziemi, przy czym żadnych z nich nie można nazwać prekursorem trzęsienia Ziemi *sensu stricte*, gdyż nie występują one przed wszystkimi trzęsieniami Ziemi, a obserwowane zmiany często są niewielkie, znajdują się na pograniczu

dokładności stosowanych metod pomiarów. Nie ma również w pełni zadowalającego modelu fizycznego, który by w uzasadniony sposób wyjaśniał występowanie prekursorów przed wstrząsem głównym.

Pomimo tego, że opublikowano dziesiątki prac i szereg książek o przewidywaniu trzęsień Ziemi i niektórzy badacze twierdzą, że przewidywanie trzęsień Ziemi jest możliwe, to jednak chłodna i ścisła analiza dotychczasowych rezultatów doprowadza nas do wniosku, że obecnie przewidywanie trzęsień Ziemi w sensie deterministycznym nie jest możliwe, gdyż na pewną okresowość w występowaniu trzęsień (cykl sejsmiczny) nakłada się znaczna składowa losowa powodująca dużą niepewność w oszacowaniu czasu trzęsienia Ziemi. Sejsmolodzy, którzy z końcem XX wieku patrzyli z dużym optymizmem na możliwości przewidywania trzęsień Ziemi, obecnie są znacznie ostrożniejsi w ocenie możliwości prognozy, a nawet można napotkać na sformułowania, że problem przewidywania trzęsień Ziemi jest „Świętym Graalem” sejsmologii (Allen 2007; Hough 2002). Pewien pesymizm i osłabienie nadziei na szybkie rozwiązanie problemu prognozy spowodowało uzmysłowienie sobie faktu, iż występowanie trzęsień Ziemi w strefach tektonicznych (gęsta sieć uskokuwa) jest procesem bardzo złożonym, w którym wystąpienie trzęsienia Ziemi w jednym miejscu może zmieniać zasadniczo rozkład naprężeń oraz stan całego układu, który może reagować w sposób chaotyczny. Dlatego postuluje się zmianę strategii przewidywania i formułowanie prognoz długookresowych, w których wyznacza się zagrożone miejsca i ocenia prawdopodobieństwo wystąpienia silnych trzęsień Ziemi, zgodnie z metodyką oceny hazardu sejsmicznego w długich okresach czasu, dziesiątek a nawet setek lat. Wyznaczenie stref zagrożenia przy odpowiednim planowaniu przestrzennym i akceptacji norm budowlanych dla nowych obiektów powoduje, że skutki takich katastrof w przyszłości można znacznie ograniczyć (Beroza, Kanamori 2007). Oczywiście, że wtedy będzie istnieć bariera ekonomiczna, szczególnie istotna dla państw rozwijających się. W prognozowaniu długoterminowym zasadniczą rolę odgrywa tektonofizyka i koncepcja luki sejsmicznej (seismic gap). W stosunku do już istniejących obiektów i miast proponuje się systemy alarmowe (stosowane w Meksyku, Japonii, Tajwanie i Turcji, a także testowane w USA), które wykorzystują oddalenie ogniska wstrząsu od chronionego obiektu i sygnalizują nadchodzące fale sejsmiczne z sekundowym wyprzedzeniem. Przy odpowiednim przeszkoleniu służb ratowniczych i ludności oraz zabezpieczeniu infrastruktury rejonu możliwe jest znaczne ograniczenie strat.

### 3.2. Wulkany

Wulkany są najbardziej spektakularnym przejawem tektonicznej aktywności Ziemi. Monitorowanie wulkanów powinno zapewnić dane do poznania ich budowy i dynamiki, ocenę zagrożenia, prognozę erupcji i czasu końca erupcji, która może trwać od ułamka dnia do dziesiątek i setek lat. W odróżnieniu od trzęsień Ziemi, prognoza powinna obejmować miejsce, wielkość i ewentualnie rodzaj erupcji, czas początku, czas kulminacji i końca erupcji. Do prognozowania erupcji stosowane są różne systemy monitorujące: geofizyczne

(sejsmologia, grawimetria, magnetyka i elektromagnetyka, geotermia), geodezyjne (GPS, InSAR, pochyłomierze), geochemiczne (zdalne pomiary emisji CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, czasem Cl i S), a także stosunki SO<sub>2</sub> : HCl oraz HCl : SO<sub>2</sub> : SiF<sub>4</sub>. Systemy te pozwalają określić aktywność i stan wulkanu, ale z dużą niepewnością i pomimo pewnych sukcesów w opracowaniu trafnych prognoz trudno jest dokładnie określić przewidywany początek erupcji, a czasem jeszcze trudniej czas jej zakończenia. Szereg trafnych prognoz (znacznie liczniejszych niż w przypadku trzęsień Ziemi) i skutecznie podjętych decyzji ewakuacyjnych pozwoliło uratować setki, a nawet tysiące istnień ludzkich (np. Pinatubo i Mayon – Filipiny, St. Helens, USA). Jednak stosunkowo liczne są przypadki błędnych prognoz lub braku ostrzeżenia przed erupcją, a występujące oznaki są niejednoznaczne lub obarczone dużą niepewnością (np. Soufriere Hills, Montserrat w 1992, Galeras – Kolumbia w 1993), gdyż wstrząsy wulkaniczne są zwykle oznaką poprzedzającą erupcję, ale mogą także sygnalizować tylko intruzję magmy do komory wulkanicznej i brak jest innych jednoznacznych prekursorów erupcji.

Jak do tej pory, nie stwierdzono w pełni wiarygodnych reguł pozwalających przewidywać zbliżającą się erupcję i w związku z tym stosuje się kompleksowo różne systemy monitoringu (Mc Nutt i in. 2000), w których sejsmologia odgrywa zasadniczą rolę, jednak nie zawsze formułowane prognozy są trafne i w pełni wiarygodne. Podobnie, jak i w przypadku trzęsień Ziemi, w wulkanologii formułuje się prognozę długoterminową opartą na ocenie prawdopodobieństwa erupcji i wykreślaniu map obszarów zagrożonych wylewem lawy, spływami popiołu i mułu (lahar). Prognoza średnioterminowa obejmuje okres tygodni do miesięcy i ocenę stanu wulkanu natomiast prognoza krótkoterminową, powinna obejmować ocenę miejsca, czasu, rodzaju i wielkości nadchodzącej erupcji z wyprzedzeniem od godzin do dni (Newhall 2000).

Pomimo tego, że istnieją pewne analogie między erupcjami wulkanicznymi a trzęsieniami Ziemi, to jednak fakt, że ewolucja procesu erupcji jest bardzo złożona i wiąże się także z rodzajem magmy, jej degazacją i podnoszeniem się w kominach wulkanicznych, co można monitorować metodami geofizycznymi, geochemicznymi i geodezyjnymi (w szczególności technikami teledetekcji satelitarnej i lotniczej) okazuje się, że przewidywanie erupcji jest skuteczniejsze niż przewidywanie trzęsień Ziemi. Jednakże problematyka prognozy w sensie naukowym także czeka na rozwiązanie, gdyż w wulkanologii definicja prognozy erupcji nie jest tak ściśle formułowana jak w przypadku trzęsień Ziemi i zwykle nie można przewidywać wielkości i rodzaju erupcji, a prognoza czasu osiągnięcia przez układ fazy kulminacyjnej lub czasu zakończenia erupcji jest także niemożliwa (Newhall 2007). Prognoza zatem zwykle ogranicza się do sygnalizacji nadchodzącego zagrożenia.

### 3.3. Osuwiska i ruchy masowe na zboczach

Zjawiska te należą do najbardziej rozpowszechnionych geologicznych zagrożeń naturalnych. Występują na większości zboczy, na których w pewnych warunkach dochodzi do niestabilności. Ruchy masowe na zboczach zwykle nie są przedmiotem tak dramatycznych

i tragicznych zdarzeń, jak trzęsienia Ziemi, czy erupcje wulkaniczne, stanowią jednak bardzo poważne zagrożenie, często wiążące się z ofiarami ludzkimi i wielkimi stratami materialnymi. Wystarczy nadmienić olbrzymie, wywołane silnym trzęsieniem Ziemi (M 8,5) osuwisko w lessach w Gansu w Chinach w 1920 roku, które objęło obszar około 50 000 km<sup>2</sup> (prowincje Ningxia i Shaanxi) i pochłonęło około 180 000 ofiar (Sidle, Ochiai 2006). Pod pojęciem osuwisk i ruchów masowych na zboczach rozumieć należy szeroką grupę różnych zjawisk, które w zależności od rodzaju skały i rodzaju ruchu obejmują obrywy i lawiny, osunięcia, sypy i pełzanie. Prędkości przemieszczeń zmieniają się w bardzo szerokich granicach od 1 [mm·rok<sup>-1</sup>] do 100 [m·s<sup>-1</sup>] (Bryant 2005). Wszystkie te zjawiska mają jasno zdefiniowany model fizyczny procesu, którym jest masa znajdująca się pod działaniem sił grawitacji i przemieszczająca się na podłożu o określonym współczynniku tarcia. W przypadku wszystkich procesów zachodzących wolno, przewidywanie można ograniczyć do określania skłonności zboczy do powstawania osuwisk i wyznaczania stref zagrożenia. Oszacowanie czasu wystąpienia niestabilności nie jest wtedy niezbędnie konieczne. W związku z tym w większości wypadków przewidywanie ogranicza się do oceny zagrożenia.

Liczne czynniki naturalne, które mają wpływ na występowanie osuwisk można podzielić na (Sidle, Ochiai 2006):

- geologiczne (rodzaj skały i stopień zwiertzenia, budowa podłoża, sprzyjające niestabilności, uwarstwienie, tektonika),
- geotechniczne, chemiczne i mineralogiczne (inżynierskie właściwości skał luźnych – właściwości chemiczne i mineralogiczne),
- geomorfologiczne (nachylenie i kształt zbocza, wysokość, miąższość zwietrzliny),
- hydrologiczne (opady, przepuszczalność i zdolności akumulacyjne zwietrzliny i podłoża, przepływy podziemne, ciśnienie porowe, wegetacja),
- sejsmiczne,
- wulkaniczne.

Czynniki te dalej można pogrupować na czynniki przygotowujące zbocze do osuwiska i czynniki inicjujące osuwisko. Analizując jednak osuwiska w skali globalnej, okazuje się, że można oszacować skłonność zbocza do występowania osuwisk (Sidle, Ochiai 2006) (dotyczy to płytkich powierzchniowych osuwisk), wykorzystując cyfrowe mapy terenu o wysokiej rozdzielczości oraz satelitarne pomiary charakterystyki gruntów, konstruując tzw. wskaźnik podatności zbocza na osuwisko (Hong i in. 2007).

Stwierdzona zaś empiryczna zależność pomiędzy natężeniem opadu  $I$  (mmh<sup>-1</sup>) i czasem trwania opadu  $D_S$  (godz.), która stanowi dolne ograniczenie prawdopodobieństwa występowania osuwiska, pozwala na prognozę wystąpienia katastrofy w danym rejonie, ale dotyczy jedynie płytkich osuwisk  $I = 14,82 D_S^{-0,39}$ .

Wykorzystując mapy wskaźnika podatności i czynniki opadów (ewentualnie dane z satelitów meteorologicznych), można w ten sposób przewidywać powstanie w zagrożonych rejonach osuwisk, a wstępna analiza takiej prognozy wskazuje na prawdopodobieństwo skuteczności prognozy 0,76, co należy uznać za sukces (Hong i in. 2007).



Różnorodność warunków i czynników powoduje, że prognozę tego typu katastrof można prowadzić w skali globalnej lub lokalnie, chociaż uwzględnienie wszystkich czynników mających wpływ na powstanie katastrofy może być trudne, a zatem prognoza będzie także zawierać czynnik losowy.

### Podsumowanie i wnioski

Należy stwierdzić, że w geofizyce i w naukach o Ziemi będziemy coraz częściej musieli podejmować bardzo trudną i złożoną problematykę związaną z przewidywaniem i stawianiem różnego rodzaju prognoz, w szczególności z przewidywaniem dużych katastrof naturalnych. Wyznając konfucjańską zasadę, że istotą wiedzy jest jej zastosowanie, a do braku wiedzy należy się wyraźnie przyznać, trzeba stwierdzić, że przy obecnym stanie wiedzy wiarygodne sformułowanie prognozy zawierającej czas wystąpienia katastrofy lub wielkość erupcji z niewielkim wyprzedzeniem jest niemożliwe, ze względu na występowanie w procesie stosunkowo dużej składowej losowej. Czy w takim razie geologiczne katastrofy naturalne są nieprzewidywalne? Uważam, że nie i chyba należy się zgodzić z C. Lomnitzem (2003), że tego typu zjawiska są przewidywalne w ograniczonym zakresie, gdyż zwykle posiadają pewne regularności w występowaniu i nie są czystymi zjawiskami losowymi. Być może, że dla nauk poznawczych należy adaptować stwierdzenie S. Hawkinga (1988), i także w przypadku katastrof naturalnych należy zmienić cel nauki i zdefiniować go jako odkrycie praw, które pozwolą przewidywać zjawiska, a nie tylko jako samo poznanie zjawisk i procesów doprowadzających do katastrof.

Z praktycznego zaś punktu widzenia należy wykorzystać maksymalnie istniejące możliwości przewidywania, które sprowadzić można do długookresowej prognozy wystąpienia silnych katastrof (ocena hazardu), odpowiednie zagospodarowanie terenu i zabezpieczenie obiektów, monitoring zagrożonych rejonów oraz szkolenie i instruktaż osób, które muszą w zagrożonych obszarach przebywać. Taki program już obecnie pozwala na znaczne ograniczenie, a nawet eliminację ofiar.

Prognozy zagrożeń geologicznych mają duży odbiór społeczny. Warunki skutecznego odbioru prognoz sformułowane przez R.A. Pielke i innych (1999) można podsumować następująco:

- prognozę należy tworzyć z myślą o odbiorcy (uwzględnić jego potrzeby),
- wszelkie niepewności muszą być wyraźnie wyszczególnione,
- ponieważ najsilniejsze katastrofy geologiczne występują bardzo rzadko, brak jest doświadczenia w zrozumieniu i wykorzystaniu prognoz,
- proces tworzenia prognoz powinien być możliwie otwarty i przejrzysty,
- prognozy należy szeroko i cierpliwie objaśniać,
- w niektórych przypadkach samo sformułowanie i opracowanie prognozy może się wiązać ze znacznym oddziaływaniem społecznym (panika), a w związku z tym konieczne jest opracowanie planów działania po rozpowszechnieniu prognozy.

Jakie można wyciągnąć wnioski odnośnie do prognozy zagrożeń naturalnych takich jak np. wstrząsy i tąpnięcia lub wyrzuty węgla, gazu i skał w górnictwie podziemnym, czy też osunięcia lub obrywy na zboczach kopalń odkrywkowych?

Należy bardzo dokładnie definiować prognozę i przeanalizować możliwości jej wiarygodnego określania. W przypadku szczegółowego monitorowania górotworu metodami geofizycznymi i geodezyjnymi przy formułowaniu prognoz nie należy żądać by w prognozie precyzować dokładnie czas wystąpienia zjawiska, gdyż może on być obarczony dużą składową losową. Znacznie bardziej wiarygodna i skuteczna będzie ocena zagrożenia (które w swej definicji nie określa czasu wystąpienia katastrofy), a podejmowana właściwa profilaktyka zapobiegawcza umożliwi bezpieczną eksploatację złoża.

Pracę przygotowano w ramach Międzynarodowego Roku Planety Ziemia.

#### LITERATURA

- Allen R.M., 2007 – Earthquake hazard mitigation: new directions and opportunities [W:] *Treatise on Geophysics*, vol. 4, Earthquake Seismology (ed. Kanamori), Elsevier, Amsterdam, Boston, London, 607–647.
- Bendat J.S., Piersol A.G., 1971 – *Random data: analysis and measurement procedures*. Wiley Interscience, New York, London.
- Beroza G.C., Kanamori A., 2007 – Comprehensive overview. [W:] *Treatise on Geophysics*, vol. 4, Earthquake Seismology (ed. Kanamori), Elsevier, Amsterdam, Boston, New York, 1–58.
- Bryant E., 2005 – *Natural hazards*. Cambridge Univ. Press. (second edition).
- Giardini D., Gruenthal G., Shedlock K., Zhang P., 2003 – The GSHAP global seismic hazard map. [W:] *Int. Handbook of Earthquake and Eng. Seismology*, part. B, (ed. Lee, Kanamori, Jennings, Kisslinger). Int. Geoph. Series, Academic Press, Amsterdam, Boston, New York, vol. 81B, 1233–1239.
- Hawking S., 1988 – *A Brief History of Time*. Bantam Press Transworld Publ., London.
- Hong Y., Adler R.E., Huffman G.J., 2007 – Satellite remote sensing for global landslide monitoring. *Eos, Transactions AGU*, vol. 88, no. 37.
- Hough S.E., 2002 – *Earthshaking science. What we know (and don't know) about earthquakes*. Princeton Univ. Press, Princeton, Oxford.
- Kanamori H., 2003 – Earthquake prediction: an overview [W:] *Int. Handbook of Earthquake and Eng. Seismology*. Part. B. (ed. Lee, Kanamori, Jennings, Kisslinger), Int. Geoph. Series, Academic Press, Amsterdam, Boston, New York., vol. 81B, 1205–1216.
- Lomnitz C., 2003 – Earthquake disasters: prediction, prevention and early warning. [W:] *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction* (ed. Zschau i Küppers), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 425–431.
- McNutt S.R., Rymer H., Stix J., 2000 – Synthesis of volcano monitoring. *Encyclopedia of volcanoes* (ed. Sigurdsson). Academic Press.
- Newhall C., 2000 – Volcano warnings. *Encyclopedia of volcanoes* (ed. Sigurdsson, Academic Press).
- Newhall C.G., 2007 – Volcanology 101 for seismologists. [W:] *Treatise on Geophysics, Earthquake Seismology* (ed. Kanamori), Elsevier, Amsterdam, Boston, New York, vol. 4, 351–388.
- Pielke Jr R.A., Sarewitz D., Byerlee Jr R, Jamieson P., 1999 – Prediction in the earth sciences and environmental policy making. *Eos Trans. AGU*, no. 28, 311–312.
- Sidle R.C., Ochiai H., 2006 – *Landslides. Processes, prediction and land use*. American Geoph. Union, Washington.
- Zuberek W.M., 2002 – Przewidywanie w naukach o Ziemi. Materiały XXII Szkoły Geologów Uniwersytetu Śląskiego w Spale. *Prace WNoZ UŚ*, nr 16 (red. Ćmiel i Cabała), 93–99.

**PRZEWIDYWANIE GEOLOGICZNYCH ZAGROŻEŃ I KATASTROF NATURALNYCH –  
OGROANICZENIA I PEWNE MOŻLIWOŚCI**

Słowa kluczowe

Katastrofa naturalna, prognoza, prekursor, zjawiska deterministyczne i losowe, trzęsienie Ziemi, erupcja wulkaniczna, osuwiska i ruchy masowe

Streszczenie

Rozwój współczesnych technik pomiarowych stwarza w geofizyce i w naukach o Ziemi duże możliwości monitoringu i (jak się oczekuje) przewidywania zjawisk i procesów, które mogą wywołać duże skutki społeczne. Przeanalizowane pewne możliwości, jak i ograniczenia w przewidywaniu geologicznych zagrożeń naturalnych, takich, jak silne trzęsienia Ziemi, erupcje wulkaniczne, osuwiska i ruchy masowe na zboczach. W tym przypadku celem prognozy jest podjęcie odpowiednich decyzji pozwalających na ograniczenie lub zminimalizowanie ujemnych wpływów oddziaływania środowiska na człowieka i jego otoczenie.

Dzieląc wszystkie zjawiska i procesy fizyczne na deterministyczne i losowe, omówione zostały syntetycznie metody opisu tych zjawisk oraz możliwości, jak i ograniczenia ich prognozy, przy czym możliwości przewidywania zawsze zależą od szczegółowej definicji prognozy.

Krótko podsumowano stan wiedzy nad przewidywaniem trzęsień Ziemi, erupcji wulkanicznych oraz osuwisk ze zboczy i ruchów masowych z uwzględnieniem geofizycznych, geochemicznych i geodezyjnych systemów monitoringu tych zjawisk i wywołujących je procesów.

W podsumowaniu i wnioskach stwierdza się, że chociaż zjawisk tych nie można na razie przewidywać w naukowym znaczeniu prognozy deterministycznej, to jednak nie są to zjawiska czysto losowe i za C. Lomnitzem (2003) należy przyjąć, że są one przewidywalne w ograniczonym zakresie. Można także oceniać zagrożenie, co przy właściwym zrozumieniu i odbiorze prognozy umożliwia ograniczenie lub nawet minimalizację skutków katastrofy.

**PREDICTION OF GEOLOGICAL HAZARDS AND NATURAL CATASTROPHES –  
LIMITATIONS AND SOME OF THE POSSIBILITIES**

Key words

Natural catastrophe, prognosis, precursor, deterministic and random phenomena, earthquake, volcanic eruption, landslides and mass movements on slopes

Abstract

The development of present-day measurement techniques creates in geophysics and in earth sciences a large opportunity of monitoring and (as it is believed) prediction of those phenomena and processes which have large social consequences. The paper involves the analysis of the possibilities and limitation in prediction of large geological catastrophes such as severe earthquakes, volcanic eruptions, landslides and mass movements on slopes. The goal of the prediction in those cases is to undertake the adequate decisions which could reduce or even minimize the negative influence of environment on humans and their surroundings.

Decomposing all physical phenomena and processes into deterministic and random groups the methods of their descriptions and the possibilities and limitations of their prediction are briefly described. The success of the prediction always depends on the details of the prediction definition.

A state of the art earthquake prediction is briefly summarized suggesting that the change in prediction strategy is needed towards the estimation of the long term seismic hazard. The determination of the hazardous zones with adequate planning and acceptance of construction regulations in the future will result in significant reduction of observed damages and fatalities.

The prediction of volcanic eruptions is more successful than in the case of earthquakes, but the problem in the scientific sense is not solved and usually is limited to the estimation of a volcanic hazard and warning the endangered residents.

In the majority of landslides and mass movements on slopes the hazard estimation is sufficient for the mitigation of the catastrophe damages but there are also some prediction possibilities.

All this leads us to the conclusion that at present we are not able to predict the geological catastrophes in the sense of the definition of the deterministic prognosis, however, those events are not strictly random. After C. Lomnitz (2003) it should be assumed that they have the limited predictability. It is possible to estimate the hazard and with adequate understanding of such predictions it enables to reduce significantly the catastrophe destructions and losses.