

## ROZDZIAŁ 2

# Terminologiczne i metodologiczne problemy prognozowania zjawisk katastroficznych na poziomie regionalnym

Mirosław HAJDER, Janusz KOLBUSZ, Beata FLOREK

Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania z siedzibą w Rzeszowie  
Miroslaw.Hajder@gmail.com, JKolbusz@wsiz.rzeszow.pl, BeataFlorek@wp.pl

### Streszczenie

*W rozdziale, przedstawiono analizę krytyczną metod i środków minimalizacji skutków pojawiania się katastrof o charakterze regionalnym. Omówiono najważniejsze przyczyny stałego wzrostu liczby katastrof oraz wielkości ich negatywnych skutków, wskazując na coraz częstszy ponadnarodowy charakter tych zjawisk. Porównano podejścia wykorzystywane do walki z katastrofami, określając przyczyny zauważalnej dominacji likwidacji skutków nad przeciwdziałaniem ich występowaniu, dokonano analizy chaosu terminologicznego panującego w badaniach, zaproponowano sposoby uporządkowania pojęć. Omówiono i sklasyfikowano metody prognozowania katastrof, przypisując każdej z nich konkretny obszar zastosowań. Zaproponowano tematy badawcze, na których powinna skoncentrować się współczesna nauka.*

### 1. Definicja zadań i obszaru badań

*Panta rhei* – to stwierdzenie Heraklita z Efezu doskonale ilustruje funkcjonowanie współczesnego świata. Chociaż odnosimy go głównie do sfery społecznej to w ciągłym ruchu znajduje się cała otaczająca nas rzeczywistość. Coraz częściej pojawiające się katastrofy są, przede wszystkim, rezultatem permanentnych zmian środowiskowych, zachodzących również na skutek działalności człowieka. W języku potocznym, *katastrofa*, to nagła zmiana charakterystyk otaczającego nas świata [1], [2]. Może mieć ona charakter *twórczy*, pozytywnie przekształcający otoczenie lub *destrukcyjny*, negatywnie wpływający na środowisko i społeczeństwo.

---

Badania w ramach projektu: *Neuronowe i immunologiczne wspomaganie analizy i syntezy modeli obiektów technicznych na bazie struktur wykorzystujących grafy rzadkie w warunkach niekompletności informacji*. Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego oraz z budżetu Państwa w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007 – 2013. Inwestujemy w rozwój województwa podkarpackiego.

Katastrofy, to naturalne zjawiska rozwoju świata i ich pojawianie jest nieuchronne. Jeżeli nie będziemy przygotowani na nie, mogą one skutkować poważnymi konsekwencjami dla człowieka i jego otoczenia [3], [4], [5].

Analizą zagrożeń zajmuje się fundamentalna dyscyplina naukowa, nazywana *ogólną teorią bezpieczeństwa* (OTB) [4], [6]. Pierwszoplanowym obiektem badań OTB jest określenie fundamentalnych prawidłowości przejścia naturalnych systemów przyrodniczych, obiektów technicznych, sfery biologicznej i struktur społeczno-gospodarczych ze stanu normalnego funkcjonowania, do stanu awaryjnego lub katastroficznego, a także zasad ich wzajemnego współdziałania w procesie wspomnianej zmiany stanu. Ponadto, OTB zajmuje się budową naukowych podstaw diagnozowania, monitoringu i prognozowania zagrożeń, a także metodami przeciwdziałania katastrofom i likwidacji ich skutków. W OTB, szczególne znaczenie zajmuje określenie sposobów szacowania i pomiarów skali zagrożeń oraz poziomu ochrony obiektów i obszarów. Na tej podstawie, definiowane są ilościowe i jakościowe parametry podejmowanych decyzji, zawartość dokumentów normatywnych oraz konkluzje komisji badających skutki awarii i katastrof. W OTB, za najbardziej uogólnione kryteria oceny, przyjęto uważać poziom ryzyka dla zdrowia i działalności człowieka, a także jakość i zagrożenia jego życia.

Do najważniejszych przyczyn pojawiania się katastrof, zaliczamy obecnie [1], [4], [7], [8], [9], [10]:

1. Zwiększoną wrażliwość na czynniki zewnętrzne środowiskowej i technologicznej sfery życia, wynikającą m. in. z naruszenia naturalnej równowagi w przyrodzie, poprzez masowe wykorzystanie zdobyczy nauki i techniki, obcych naturalnemu środowisku;
2. Utrudniające naturalną regenerację biosfery: antropogeniczne przekształcenie środowiska naturalnego, poszerzenie technosfery, a także masową eksploatację dotychczas dziewiczych obszarów Ziemi;
3. Wysoką wrażliwość społecznej sfery życia na klęski żywiołowe i technologiczne, przejawiającą się potęgowaniem negatywnych skutków katastrof.

Chociaż na Podkarpaciu, nie występują zjawiska niosące najpoważniejsze zagrożenia, takie jak: trzęsienia ziemi, zjawiska wulkaniczne, tornada czy tsunami, prawdopodobieństwo pojawienia się innych rodzajów katastrof naturalnych, technologicznych czy humanitarnych jest ciągle wysokie. Najistotniejsze zagrożenia województwa, to w głównej mierze konsekwencje: niestabilności geopolitycznej regionu, obecności zakładów przemysłowych wykorzystujących niebezpieczne technologie, zakrojonej na szeroką skalę produkcji militarnej, lokalizacji jednostek wojskowych biorących udział w walce z terroryzmem oraz coraz częstszych, gwałtownych zjawisk pogodowych. Z tego powodu, bezzwłocznie należy podjąć wielostronne działania, mające na celu prognozowanie wystąpienia oraz przeciwdziałanie pojawianiu się katastrof. W pierwszej kolejności, prace te powinny obejmować badania naukowe w danych obszarach. Ich celem nadrzędnym powinna być maksymalizacja bezpieczeństwa ludzi i mienia, przy jednoczesnej

minimalizacji kosztów likwidacji następstw nieuchronnych katastrof [8], [9], [11], [12], [13].

Badania dotyczące bezpieczeństwa w obszarach naturalnym i technologicznym obejmują zazwyczaj trzy płaszczyzny: teoretyczną, aplikacyjną oraz zarządczą. Prace realizowane w płaszczyźnie *teoretycznej* mają na celu: pozyskanie nowej wiedzy, pozwalającej zrozumieć zachodzące zjawiska oraz przygotowanie zaleceń, określających metody przeciwdziałania zagrożeniom. Badania *aplikacyjne* zajmują się przygotowaniem wytycznych projektowania i budowy bezpiecznych obiektów technicznych, oceną poziomu stabilności istniejących budowli, sposobami przedłużenia okresu ich bezpiecznej eksploatacji lub poprawą odporności na występujące zagrożenia. Ponadto, w ich ramach przygotowuje się metody prognozowania zmian stanu systemów naturalnych i technicznych oraz szybkiego podejmowania działań zmierzających do minimalizacji szkód wywołanych przez klęski żywiołowe. Prace w płaszczyźnie *zarządzania*, mają na celu opracowanie i wdrożenie procedur reagowania na zagrożenie na każdym z poziomów władzy państwowej i samorządowej.

Na powyższych płaszczyznach powinny być prowadzone zarówno badania podstawowe, jak i stosowane. Głównymi zadaniami badań podstawowych są: określenie najważniejszych zasad bezpieczeństwa złożonych systemów technicznych, klasyfikacja katastrof oraz obiektów technicznych i ich podatności na zagrożenia, a także poszukiwanie sposobów przeciwdziałania katastrofom i minimalizacji ich negatywnych skutków. Badania te powinny uwzględniać wszelkie uwarunkowania rozwoju społeczno-gospodarczego. Zakres prac powinien obejmować analizę prawidłowości regulujących pojawianie i przebieg katastrof charakteryzujących się okresowością występowania, a także poziom strat ponoszonych przez ludność, przedsiębiorstwa, jak również przez środowisko naturalne. Na ich podstawie, przygotowuje się scenariusze przebiegu katastrof, wybiera i wdraża efektywne metody ochrony. Rozwiązując powyższe zadania, niezbędnym jest prowadzenie badań systemowych w obszarach: geologii, hydrologii, mechaniki, fizyki i in., bezpośrednio odnoszących się do badanych katastrof. Prace te powinny opierać się na zastosowaniu modeli wielowymiarowych i modelowania imitacyjnego, co implikuje ich czaso- i kosztochłonność. Wysoką złożonością charakteryzują się także badania nad minimalizacją skutków katastrof. Prace prowadzone w obszarze badań podstawowych nie mogą wykluczyć badań eksperymentalnych. Zazwyczaj są one podstawą wyznaczenia prawidłowości wiążących symptomy katastrofy z ich pojawianiem. Nierzadko, badania te przynoszą zaskakujące wyniki. Przykładowo, trzęsienia ziemi zazwyczaj poprzedzają zmiany struktury przestrzennej jonosfery.

Najbardziej oczekiwanym wynikiem badań podstawowych są nowe, skuteczniejsze metody prognozowania zagrożeń. Mogą być nimi również sposoby minimalizacji skutków katastrof, a także atlasy zagrożeń naturalnych i technologicz-

nych, przygotowywane dla obszarów z największą koncentracją niekorzystnych zjawisk.

Podobnie jak w przypadku innych dyscyplin naukowych, *badania stosowane* prowadzone są zazwyczaj w oparciu o wyniki badań podstawowych. Prace te obejmują dostosowanie przygotowanych wcześniej teorii do ich wdrożenia na bazie dostępnych rozwiązań technicznych. Badania stosowane, szeroko wykorzystują analizę systemową, pozwalającą opracować i wdrożyć zestaw ogólnych zasad, którymi należy się kierować, w celu zagwarantowania skuteczności i bezpieczeństwa ochronnych systemów technicznych. W szczególności, budując je, należy opierać się na poniższych, podstawowych zasadach:

1. *Zasadie wielopoziomowości systemu ochrony.* Systemy ochronne powinny mieć strukturę warstwową, pozwalającą kompensować skutki potencjalnych uszkodzeń własnych komponentów. Należy zapewnić automatyczne ograniczenie funkcjonalnych i decyzyjnych właściwości systemu w przypadku jego uszkodzenia. Ograniczenia te limitują zakres automatycznych działań, w stosunku do normalnej pracy i pojawiają się natychmiast po wykryciu uszkodzenia;
2. *Zasada niezależności i różnorodności.* Zakłada ona możliwość wystąpienia uszkodzenia lub błędów w systemie ochronnym. Oznacza to, że niesprawność wybranych elementów, nie ogranicza funkcjonalności systemu jako całości. W praktyce, implementacja danej zasady sprowadza się do nadmierowania czasowego, sprzętowego i funkcjonalnego systemów ochronnych;
3. *Zasada autodiagnostyki.* Zgodnie z nią, najbardziej prawdopodobne niesprawności systemu, będące skutkiem zagrożenia, są diagnozowane autonomicznie przez sam system, znacznie wcześniej niż wykrywane jest samo zagrożenie.

Choć badania nad katastrofami prowadzone są od kilkadziesiąt lat [14], [15], [16], [17], to właśnie ostatnie lata, z wielu różnych powodów, zmieniły naukowe podejście do badania tych zjawisk. *Po pierwsze*, z początkiem XXI wieku pojawiło się wiele nowych analitycznych i empirycznych narzędzi badawczych, pozwalających poprawić skuteczność prognozowania wystąpienia i przebiegu zjawisk katastroficznych. W szczególności, powszechnie dostępne stały się bezprzewodowe sieci sensorowe WSN (ang. *Wireless Sensor Network*), pozwalające z dużą precyzją, w czasie rzeczywistym, śledzić zmiany wybranych parametrów środowiska i dowolnych obiektów technicznych [18], [19]. Na podstawie pozyskanych z nich informacji, są opracowywane i eksploatowane, coraz to doskonalsze modele matematyczne zachodzących zjawisk. *Po drugie*, pojawiły się nowe typy zagrożeń, występujące dotąd w znacznie mniejszej skali i niebędące przedmiotem zainteresowania naukowców i polityków [10], [6]. Przykładem są tutaj katastrofy humanitarne, które jeszcze kilka dziesięcioleci temu były najczęściej przemilczane. Zazwyczaj, są one skutkiem niestabilności społeczno-politycznej, ale ich przyczyną mogą być także katastrofy naturalne i technologiczne.

Szczególny rodzaj zagrożeń niesie ze sobą rozwój nauki i techniki. Początkowo, miał on charakter twórczy, ukierunkowany na poprawę poziomu życia. Z czasem, wraz z wyczerpywaniem się bogactw naturalnych, wzrostem konkurencji i globalizacją gospodarki światowej, dla dużych korporacji stał się on podstawowym narzędziem pogoni za zyskiem. *Po trzecie*, informatyka dostarczyła nowych, wydajniejszych i bardziej niezawodnych środków przetwarzania, pozwalających jednocześnie analizować wszystkie zagrożenia występujące na danym obszarze. Dzięki temu, opracowywane prognozy są kompleksowe, bardziej precyzyjne i dostarczane z większym wyprzedzeniem [6], [20], [21], [22].

Potrzeba kompleksowości badań w obszarze katastrof, niesie ze sobą szereg nowych, nieznanych wcześniej problemów. Jednym z nich jest interdyscyplinarność, wymuszająca prowadzenie badań z wykorzystaniem wielu, nierzadko bardzo odległych od siebie dyscyplin naukowych [23]. Niektóre z nich, korzystają z terminologii i metodologii przygotowanych specjalnie do badania konkretnego zjawiska, inne zaś wykorzystują uniwersalne techniki, charakterystyczne dla danej dziedziny [24], [25]. Jednak w obu przypadkach, z uwagi na istotne różnice terminologiczne i metodologiczne, ścisłe współdziałanie ze sobą grupy dyscyplin jest bardzo utrudnione. W rezultacie, interdyscyplinarność badań jest tylko pozorna, co wyklucza możliwość pojawienia się pożądanego efektu synergii.

Obecnie, walka z katastrofami, najczęściej sprowadza się do opracowania procedur likwidacji ich skutków. Podejście takie jest nieefektywne i w dłuższej perspektywie przyniesie poważne negatywne konsekwencje. Każda kolejna katastrofa, powoduje niepowetowane straty w środowisku i społeczeństwie, w wielu przypadkach niemożliwe już do nadrobienia. Dlatego, aktualnie należy skoncentrować się na działaniach prewencyjnych, minimalizujących prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożeń. Ograniczenie się do usuwania skutków katastrof wynika z:

1. *Złożoności zadania prognostycznego.* Już samo przewidywanie pojawienia się zagrożenia jest zadaniem złożonym, wymagającym uwzględnienia ogromnej liczby różnorodnych czynników. Modelowanie skuteczności działań prewencyjnych jest procesem jeszcze bardziej skomplikowanym. Ponadto, rezultaty większości takich badań, nie są wdrażane, co nie sprzyja zainteresowaniu ich finansowaniem;
2. *Niedoskonałości w podziale obowiązków.* Dbałość o stan obiektów ochronnych spoczywa na znacznej ilości organizacji, zarówno na powołanych do tego służbach państwowych, jak również samorządach oraz prywatnych i publicznych podmiotach gospodarczych, a także osobach fizycznych. Służby mają zazwyczaj ograniczony wpływ na właścicieli lub zarządców obiektów, którzy nie troszczą się o stan techniczny infrastruktury ochronnej.
3. *Niedoskonałej struktury organizacyjnej.* Rola państwa w monitoringu środowiska i stanu infrastruktury ochronnej na poziomie regionalnym jest niewystarczająca. W mikroskali, monitoring jest realizowany przez znaczną liczbę, niepowiązanych ze sobą jednostek, z których każda, zajmuje się ograniczo-

nym obszarowo i jakościowo pomiarem parametrów. Ponadto, podmioty te nie mają obowiązku prognozowania katastrof;

4. *Przewlekłości procesów prawnopolitycznych.* Przyczyny i skutki wielu spośród zagrożeń mają charakter ponadnarodowy. Przeciwdziałanie im wymaga uzgadniania i ratyfikowania umów międzynarodowych, co jak pokazuje doświadczenie, jest procesem wyjątkowo długotrwałym i kosztownym. Niestety, przeciąganie się wielostronnych uzgodnień, często przyczynia się do zwiększania strat wynikających z braku działań zapobiegawczych.

Pomimo powyższych ograniczeń, należy oczekiwać, że w niedalekiej przyszłości bazujące na modelowaniu metody prewencyjne będą się intensywnie rozwijać, a ich rola zostanie zauważalnie poszerzona.

## 2. Niejednorodność terminologiczna

Ogólna teoria bezpieczeństwa opiera się na terminologii włączającej takie pojęcia jak: bezpieczeństwo, zagrożenie, ochrona, prawdopodobieństwo, ryzyko, awaria, katastrofa, sytuacja nadzwyczajna, środowisko naturalne, czynniki rażenia, niebezpieczny wpływ, reakcja systemu i in. Niestety, analiza materiałów źródłowych z dziedziny modelowania obiektów i katastrof pokazuje, że w obszarach tych panuje nieład terminologiczny i metodologiczny, wynikający z niedostatecznej systematyzacji obu wskazanych obszarów. W przestrzeni terminologicznej, wykorzystywane są wyłącznie płaskie klasyfikacje rodzajowe, bazujące na typie obiektu bądź zjawiska. Pomimo zbieżności, a w wielu przypadkach identyczności opisu matematycznego, wykorzystanie przygotowanych metodologii jest zawężone wyłącznie do badania zachowania konkretnego typu obiektu lub zjawiska. W rezultacie, prowadzone badania nie są interdyscyplinarne, co skutkuje brakiem efektu synergii, a wyniki prac mogą być wykorzystywane wyłącznie w jednej dyscyplinie naukowej. Powyższe prawidłowości, obserwuje się w takich obszarach jak: mechanika i elektrotechnika, hydrologia i geologia, chemia i biologia, zarządzanie kryzysowe, polityka, psychologia i socjologia. Celowym jest zatem podjęcie prac nad ujednoczeniem aparatu pojęciowego, służącego do opisu obiektów i zachodzących z ich udziałem zdarzeń.

W przeciągu ostatniego dziesięciolecia, w obszarze badań nad zagrożeniami, pojawiła się nowa tendencja. Z uwagi na masowe zastosowanie personalnego sprzętu komputerowego o niskiej cenie i relatywnie niewielkiej mocy obliczeniowej, obserwuje się odchodzenie od wykorzystania uogólnionych modeli i metodyk badawczych, na rzecz uszczegółowionych, adresowanych do bardzo wąskiego obszaru tematycznego. Dzięki takiemu podejściu, tworzenie dedykowanych aplikacji informatycznych znacznie się upraszcza, zmniejszają się również ich złożoności: pamięciowa i czasowa, przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności w skali makro. Kosztem takiego podejścia jest powielanie przez różne zespoły prac nad budową i wdrożeniem, nierzadko bardzo złożonych aplikacji [24].

W opisywanym przypadku, badania dotyczą wąskiego obszaru tematycznego i problem niejednorodności terminologiczno-metodologicznej odgrywa drugoplanowe znaczenie. Jednak wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów PC, opisywana tendencja będzie stopniowo zanikać, a wspomniany problem niejednorodności powróci ze zwielokrotnioną siłą.

Ujednoczenia terminologicznego, w pierwszej kolejności, należy poszukiwać w obszarze matematycznej teorii katastrof (MTK) R. Thom'a i Ch. Zeeman'a [3], [26], [27]. MTK zajmuje się analizą przestrzenno-czasowych modeli i praw rozwoju katastrof, zachodzących w systemach i strukturach złożonych, bez szczegółowego rozróżnienia rodzajów obiektów i zjawisk. Niestety, nawet w ramach samej MTK brakuje jednolitości terminologicznej. Zgodnie z definicją podawaną w pracach V. I. Arnolda katastrofa to gwałtowna jakościowa zmiana obiektu, w wyniku jednostajnej ilościowej zmiany jego parametrów. Z kolei definicja, zgodna z pracami H. Poincare, określa katastrofę, jako utratę stabilności harmonicznego ruchu systemu i jego skokowe przejście do nowego stanu równowagi, z aktualnymi parametrami tegoż ruchu. Z tego i kilku innych powodów, należy przyjąć, że bezpośrednio wykorzystanie nazewnictwa, pochodzącego z matematycznej teorii katastrof nie jest możliwe, a MTK powinna posłużyć wyłącznie, jako punkt wyjścia do budowy nowego, uogólnionego aparatu pojęciowego.

O ile wykorzystanie matematycznej teorii katastrof do ujednoczenia aparatu pojęciowego interdyscyplinarnych badań nad zagrożeniami nie budzi wątpliwości, to jej zastosowanie do ich prognozowania jest bardzo problematyczne. MTK pozwala skutecznie analizować wyłącznie zachowania systemów technicznych, a wykorzystanie jej w biologii, psychologii, socjologii bądź do analizy rynku kapitałowego, skutkuje jedynie przygotowaniem mało precyzyjnych, heurystycznych oszacowań zachodzących zmian. W odniesieniu do obiektów technicznych, MTK rozwiązuje tylko zadanie określenia warunków powstania katastrofy, nie pozwalając nawet oszacować jej lokalizacji i momentu wystąpienia [27], [28], [26], [29], [30], [31], [32]. Dlatego, należy przyjąć, że precyzyjne prognozowanie katastrof, trzeba oprzeć na wykorzystaniu specjalistycznych metod i metodyk powstałych m. in. na bazie MTK.

Niejednoznaczność i niejednorodność terminologiczna dotyczy również strony prawnej opisu katastrof. Przykładem może tu posłużyć określenie siły wyższej. W komentarzach do prawa cywilnego, niejednokrotnie zwracano uwagę na dyskusyjność i niejednoznaczność legalnego określenia *siła wyższa*. Sygnalizowany problem jest istotny, ponieważ określenie to, pojawia się w wielu umowach cywilno-prawnych, w klauzulach zwalniających strony z odpowiedzialności za istniejące szkody. Ekspertki skłaniają się do interpretacji, zgodnie z którą cechami kwalifikującymi siły wyższej są nadzwyczajność i nieuniknioność w danych warunkach. Jednocześnie, nadzwyczajności przypisują wyjątkowość i dużą siłę działania, z kolei nieuniknioność wiązana jest z niemożliwością zapobieżenia szko-

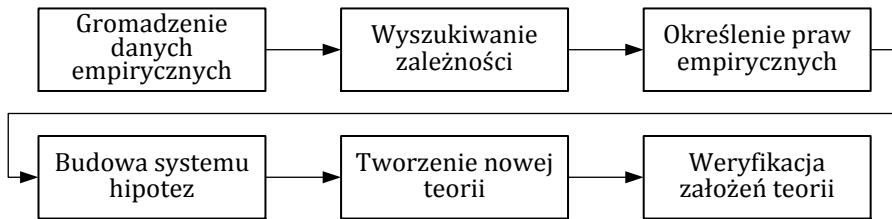
dliwemu działaniu siły wyższej, za pomocą środków dostępnych danemu podmiotowi.

Podobne wątpliwości prawne, pojawiają się przy próbie jednoznacznej interpretacji terminu *sytuacja nadzwyczajna*. W szczególności, błędną jest interpretacja uznająca każdą sytuację nadzwyczajną, jako siłę wyższą. Część spośród znanych definicji, za sytuację taką uznaje stan zagrażający suwerenności państwa, podstawom ładu konstytucyjnego, bezpieczeństwu obywateli, normalnej działalności instytucji państwowych oraz samorządowych i wymagający podjęcia przez społeczeństwo i państwo energicznych, ekstremalnych i nadzwyczajnych działań prawno-organizacyjnych mających na celu jego likwidację.

### 3. Metody prognozowania zjawisk katastroficznych

#### 3.1. Interdyscyplinarność prognozowania

Ogólna teoria bezpieczeństwa, włączająca analizę zjawisk katastroficznych, w ostatnim dziesięcioleciu istotnie zmieniła swoje podejście do prowadzonych badań. W miejsce analizy danych empirycznych i tworzenia selektywnych modeli matematycznych, przeszła ona do kompleksowego badania wzajemnie powiązanych zjawisk i ich skutków. Klasyczne podejście do budowy OTB zaprezentowano na rys. 1.



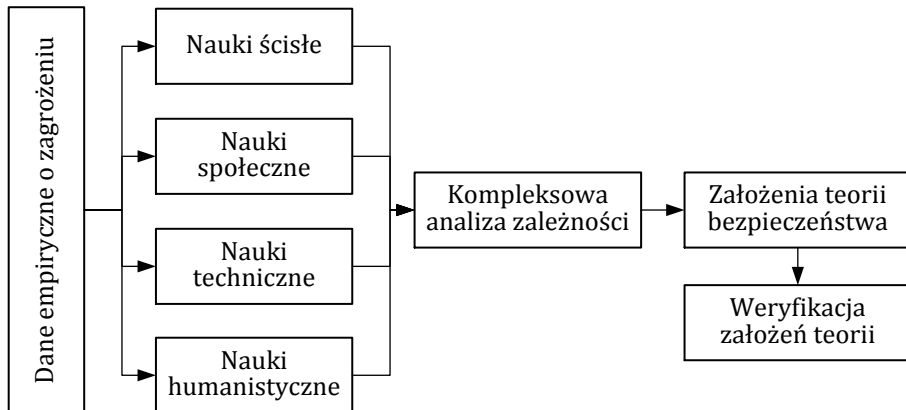
Rys. 1. Klasyczne podejście do budowy ogólnej teorii bezpieczeństwa

Zgodnie z nim, tworzenie teorii, rozpoczyna się od gromadzenia danych empirycznych opisujących wybrane zjawisko, pochodzących z wieloletnich obserwacji lub pomiarów. Następnie, z wykorzystaniem analizy statystycznej bądź innych metod formalnych, określone są współzależności pomiędzy zebranymi danymi i zachodzącymi zjawiskami. Na ich podstawie, definiowane są prawa empiryczne opisujące badane zjawisko, wykorzystywane dalej do budowy systemu hipotez. Na ich bazie tworzona jest nowa teoria, podlegająca późniejszej weryfikacji. Ponieważ powstaje ona w wyniku wybiórczej analizy, zarówno przebiegu zjawisk, jak i mechanizmów ich powstawania, nie uwzględnia ona całości zmian zachodzących w środowisku naturalnym, technicznym i społeczno-gospodarczym.

Zagrożenia analizowane przez OTB są zazwyczaj wzajemnie powiązane. Oznacza to, że skutkiem wystąpienia jednego zjawiska jest nieuchronne pojawienie innego, nierzadko o diametralnie różnej przyrodzie. Przykładowo, wielkoskalowe katastrofy naturalne obligatoryjnie implikują katastrofy humanitarne. W klasycz-



nym podejściu, oba rodzaje katastrof są prognozowane i analizowane niezależnie. Istotą podejścia interdyscyplinarnego jest jednoczesne badanie grupy różnych zagrożeń z wykorzystaniem wielu dyscyplin naukowych. Koncepcję budowy ogólnej teorii bezpieczeństwa w oparciu o interdyscyplinarną analizę zachodzących zjawisk, przedstawiono na rys. 2.

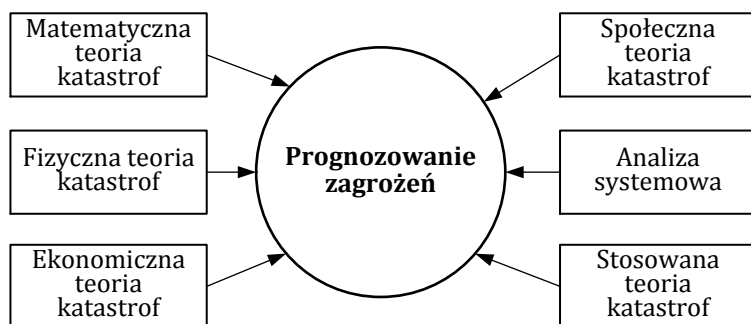


Rys. 2. Interdyscyplinarne podejście do tworzenia ogólnej teorii bezpieczeństwa

Podobnie jak w poprzednim przypadku, procedurę budowy OTB, rozpoczyna gromadzenie danych empirycznych charakteryzujących zagrożenie, które następnie są analizowane za pomocą zestawu dyscyplin naukowych, opisujących zjawisko. Następnie, wykonywana jest kompleksowa analiza zależności, określająca korelacje pomiędzy poszczególnymi komponentami, na bazie której tworzone są podstawowe założenia OTB. W najprostszym przypadku, interdyscyplinarność pozwala analizować różnorodne skutki (środowiskowe, społeczne lub ekonomiczne) konkretnego zagrożenia. Możliwe jest również jednoczesne badanie wielu zagrożeń, co wymaga jednak znaczących mocy obliczeniowych, niezbędnych do uruchomienia grupy wzajemnie powiązanych modeli matematycznych. Podejście interdyscyplinarne można również wykorzystywać do opracowania prognoz pojawienia, przebiegu, a także przeciwdziałania zjawiskom katastroficznym.

*Matematyczna teoria katastrof* jest algorytmiczną podstawą procedur prognozytycznych. Z uwagi na zbytnią ogólność, wykorzystanie klasycznej MTK, nie jest zalecane. Wykorzystywana teoria, powinna analitycznie opisywać zjawiska zachodzące w trakcie katastrof, zapewniając jednocześnie możliwość implementacji modelu w postaci programu komputerowego. *Fizyczna teoria katastrof* określa przestrzenno-czasowe charakterystyki ich przebiegu. Teoria ta, powinna szczegółowo opisywać zjawiska zachodzące, zarówno w trakcie katastrofy, jak i przed oraz po jej zaistnieniu. *Ekonomiczna teoria katastrof* zajmuje się analizą wzajemnego wpływu ekonomii i zagrożeń. Powinna ona uwzględniać oddziaływanie katastrof na ekonomikę regionu, a także wpływ tej ostatniej na pojawianie się zagrożeń.

*Społeczna teoria katastrof* analizuje uwarunkowania powstawania i przebiegu katastrof, wynikające z przebywania ludzi na obszarze objętym zdarzeniem. Teoria ta, analizuje czynniki społeczne, przyczyniające się do powstawania zagrożeń, a także pogłębiające negatywne skutki katastrof. *Analiza systemowa* bada właściwości katastrof, w szczególności określa ujednoczone fizyczne i społeczne prawidłowości ich powstawania i przebiegu, wykorzystywane w procesie prognozowania. *Stosowana teoria katastrof* (STK) jest elementem wiążącym wszystkie dyscypliny tworzące procedurę prognozowania. W ramach STK, opracowywane są interdyscyplinarne metodyczne, algorytmiczne i programowe podstawy prognozowania, zarówno w skali globalnej, jak również regionalnej. Metodologiczne komponenty takiego prognozowania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Grupa teorii wykorzystywanych w badaniach nad prognozowaniem zjawisk katastroficznych

Interdyscyplinarność procedur prognozowania to obecnie konieczność. Tylko wtedy, możliwe jest jednoczesne uwzględnienie zbioru naturalnych, antropogenicznych, medycznych i socjalnych procesów, uprawdopodobniających pojawienie się katastrof. Procesy te mogą przebiegać równoległe lub kaskadowo, może wiązać je synergia, mogą być one również niezależne. Zauważmy, że powiązanie człowieka z jego otoczeniem ma nieskończenie złożony charakter i w wielu przypadkach nie jest możliwy jawny tego opis. Z drugiej jednak strony, wzajemne relacje człowiek-środowisko, muszą być obowiązkowo uwzględnione w procesie prognozowania. Dodatkowo, interdyscyplinarność sprzyja odejściu od metod probabilistycznych i zastąpieniu ich metodami numerycznymi, zapewniającymi większą precyzję i wiarygodność prognozowania. Przyszłość prognozowania katastrof należy wiązać z metodami hybrydowymi, w których techniki probabilistyczne wspomagane będą za pomocą podejścia numerycznego, doskonalącego dokładność wyników w ujęciu ilościowym i czasowym.

### 3.2. Klasyfikacja metody analizy i prognozowania katastrof

Liczba różnorodnych metod wykorzystywanych obecnie do analizy i prognozowania występowania oraz przebiegu zjawisk katastroficznych, zbliża się do 200. Zazwyczaj, metody te dzielone są na trzy grupy: metody heurystyczne, ekstrapo-

lacyjne oraz modelowanie matematyczne. Za najbardziej przyszłościowe powszechnie uważa się metody modelowania matematycznego, które dzieli się na: eksperymentalne metody modelowania procesów naturalnych i technologicznych; numeryczne metody modelowania oraz metody jednoczesnego wykorzystania zweryfikowanych modeli i obliczeń inżynierskich. O ile wcześniej analizie poddawane były pojedyncze zjawiska o ograniczonym zasięgu, to obecnie badania obejmują również wielostronne zagrożenia, w których powiązanie pomiędzy ich składnikami nie występuje lub jest nieistotne. Dlatego, do badania grupy zagrożeń coraz częściej wykorzystuje się metody hybrydowe, łączące w sobie narzędzia każdej z klasycznych metod prognostycznych.

Prognozowanie może mieć charakter krótko- lub długoterminowy. Prognozowanie *krótkoterminowe* pozwala określić spektrum prawdopodobieństw pojawienia się na wskazanym obszarze, różnych sytuacji nadzwyczajnych o charakterze naturalnym lub technologicznym. Prognozowanie *długoterminowe* ma na celu kompleksową ocenę ryzyka wystąpienia zagrożeń z uwzględnieniem prawdopodobieństw ich pojawienia i towarzyszących temu strat, do czego wykorzystywane są metodologie analizy i zarządzania ryzykiem. Uzyskiwane w ten sposób wyniki, wykorzystuje się m. in. jako: dane wejściowe do opracowania i weryfikacji planów zapobiegania i likwidacji skutków katastrof, przygotowania map zagrożeń obszarów i obiektów, a także do ukierunkowania działań organów władzy w zakresie reagowania na zagrożenia.

### 3.3. Bazowe metody analizy i prognozowania katastrof

W chwili obecnej, przy badaniu katastrof, najszerze zastosowanie znalazły *metody statystyczne*, zakładające utworzenie zbioru danych statystycznych, jego systematyzację oraz późniejsze przetworzenie za pomocą stosownych metodyk. Choć metody te są stosowane bardzo szeroko, ich znaczenia nie należy przeceniać. Jednym z podstawowych błędów popełnianych w procesie ich wykorzystania jest ograniczenie się do matematycznej analizy zgromadzonych danych z pełnym pominięciem fizycznego mechanizmu zjawiska. Rola analizy statystycznej powinna ograniczać się do oceny poprawności wykrytej w procesie analizy istoty zjawiska bądź procesu. W prognozowaniu katastrof, szeroko wykorzystywana jest odmiana metod statystycznych, tzw. *analiza częstotliwościowa*. W klasycznym zastosowaniu, stworzona przez kryptologów metoda, porównuje częstości występowania znaków alfabetu w łamanym tekście tajnym z częstością ich pojawiania się w danym języku, dzięki czemu symbolom kryptogramu przypisywane są znaki tekstu jawnego.

Metody statystyczne są najszerzej wykorzystywane w meteorologii i hydrologii, gdzie stosuje się je do analizy niebezpiecznych zjawisk pogodowych. Opierają się na analizie gromadzonych od wielu stuleci danych o zjawiskach pogodowych. Mają one jednak kilka istotnych wad, z których najważniejszą jest konieczność znajomości funkcjonałów rozkładu prawdopodobieństwa zjawisk katastroficznych,

od którego dokładności zależy precyzja prognozowania. Niestety, w wielu przypadkach czasookres obserwacji zjawiska jest zbyt krótki, aby zdefiniowany na jego bazie rozkład był precyzyjny. Ponadto, statystyka, podobnie jak każda inna metoda matematyczna posiada sztywne zakresy, w których powinny znajdować się formalno-matematyczne rozkłady opisujące badane zjawiska. Niestety, sposoby określania prawdopodobieństw w tych obszarach są nieprecyzyjne lub w ogóle nieznanne.

Szerokie rozpowszechnienie metod statystyczno-częstotliwościowych doprowadziło do odkrycia wielu prawidłowości powtarzających się w przyrodzie i społeczeństwie, w takich obszarach jak: medycyna, socjologia, meteorologia, seismologia czy wulkanologia [33], [34]. Zajmująca się tym problemem *teoria cykli* opisuje zasady ich zmian oraz cechy szczególnie korelacji pomiędzy cyklami. W szczególności wyróżniono następujące prawidłowości:

1. Cykle falowe lub spiralne są wszechobecne we wszystkich powtarzających się zjawiskach, w których występują fazy wznoszenia i opadania bądź przyspieszania i spowalniania zachodzących zmian;
2. Cykle są wzajemnie powiązane, krzywa dynamiki dowolnego cyklu jest wypadkową wpływu innych cykli, nawet tych z niepowiązanych obszarów;
3. Wpływ cykli zewnętrznych może wzmacniać lub osłabiać przebieg danego cyklu, naruszając w ten sposób jego naturalny przebieg.

Chociaż w szeregu dyscyplin, ponad wszelką wątpliwość, udowodniono występowanie cykli, ich wykorzystanie do prognozowania katastrof napotyka na szereg istotnych przeszkód. Nie zawsze, cykle posiadają czytelne powiązanie z określonym czynnikiem bądź ich kombinacją, wywołujące pojawienie się katastrofy. W takim przypadku, jakiegokolwiek prognozowanie jest utrudnione, a nawet niemożliwe. Dla występowania katastrof, długości cykli nie są precyzyjne, a dla zjawisk długoterminowych, rozbieżności mogą sięgać miesięcy, a nawet lat. W ostatnich latach, z uwagi na wyjątkowo intensywną eksploatację środowiska naturalnego, zaobserwowano naruszenie cykliczności szeregu zjawisk o charakterze katastroficznym. Analiza powyższych prawidłowości, pokazuje, że zastosowanie analizy częstotliwościowej i teorii cykli do prognozowania jest problematyczne [26], [35].

Istnieje szereg zjawisk, których opis matematyczny jest utrudniony lub wręcz niemożliwy. Ich przykładem są wahania cen akcji na giełdzie, będące skutkiem zmiany sytuacji społeczno-politycznej, czy pojawianie się w litosferze, nieobecnych wcześniej związków chemicznych, poprzedzające trzęsienie ziemi. Do prognozowania takich zjawisk można zastosować *metodę analogii*, polegającą na wyszukiwaniu podobieństw procesów poprzedzających katastrofy i porównaniu ich zmian w różnych okresach czasu [36], [37]. W metodzie tej, analizuje się nie tylko zjawiska bezpośrednio powiązane z prawdopodobną katastrofą, ale również jej obce. Poszukuje ona podobieństw w mechanizmach pojawiania się katastrof, włączając w to powiązania o niejawnym charakterze. Jest ona szczególnie przydatna w sytuacjach, kiedy zachodzące zjawiska trudno jest opisać za pomocą za-

leżności analitycznych. Porównanie podobieństwa charakteru zmian różnych parametrów istotnie upraszcza badania analityczne, w wielu przypadkach umożliwiając matematyczny opis zjawiska. Interesujące efekty można uzyskać wykorzystując do wyszukiwania podobieństw metody częstotliwościowe. Podstawową wadą metody jest konieczność wyszukiwania i późniejszego przetwarzania analogii, co na chwilę obecną nie jest dostatecznie sformalizowane. Ponadto, określenie ewentualnych podobieństw wymaga przetworzenia ogromnej ilości danych, co zazwyczaj jest wyjątkowo czasochłonne.

Również inne techniki analizy porównawczej znalazły zastosowanie do prognozowania katastrof. Przykładem ich wykorzystania jest *metoda porównania szybkości zmian*. Analizie podlegają w niej czynniki, z pozoru nie związane z prognozowaną katastrofą, niejawnie wpływające na zachodzące zjawiska. Użycie metody pozwoliło wykryć szereg prawidłowości występowania katastrof, w szczególności powiązanie ich z innymi procesami zachodzącymi w środowisku. Przykładowo, w wyniku wieloletnich obserwacji meteorologicznych określono, że trzęsienia ziemi zachodzą głównie w okresie gwałtownych globalnych i lokalnych zmian stanu atmosfery. W szczególności stwierdzono, że poprzedzają je fronty atmosferyczne oraz gwałtowna zmiana ciśnienia. W ostatnim dziesięcioleciu, dzięki szerokiej dostępności funkcjonujących w czasie rzeczywistym, autonomicznych urządzeń monitoringu lokalnego, metody te rozwijają się nadzwyczaj szybko. Różnorodność mierzonych wielkości oraz ciągłość pomiarów, pozwalają uwzględnić przy prognozowaniu gradienty śledzonych parametrów. W czasie rzeczywistym są one porównywane z wartościami archiwalnymi, zarejestrowanymi bezpośrednio przed pojawieniem się katastrofy [38], [39], [40].

*Metody analizy energetycznej* oparte są na permanentnym śledzeniu zmian potencjałów energetycznych środowiska. Przykładowo, przy prognozowaniu trzęsień ziemi, śledzone jest sejsmiczne pole falowe. W tym przypadku, metoda opiera się na monitoringu geodynamicznym, pozwalającym ocenić wpływ wymuszeń dynamicznych na badany system [38], [39]. Analiza wszelkich anomalii, pozwala prognozować zachowanie systemu dla różnych wymuszeń zewnętrznych. Podobne metody można wykorzystywać do analizy wielu zjawisk naturalnych, w tym również w obszarze biologii.

*Metoda poziomów krytycznych* analizuje wartości wskaźników uprawdopodobniających pojawienie się katastrof. Jej najważniejszą zaletą jest łatwość realizacji, bowiem nie wymaga ona zastosowania skomplikowanego aparatu matematycznego, wspomaganego przez rozbudowane narzędzia informatyczne. Działanie metody sprowadza się do ciągłej analizy wartości wybranych parametrów, na których podstawie można przewidzieć wystąpienie katastrofy. Jej podstawową wadą są rozbieżności wartości parametrów krytycznych dla różnych badanych lokalizacji. Okazuje się, że w jednym miejscu może zostać osiągnięta wartość krytyczna śledzonego parametru, podczas gdy w pozostałych lokalizacjach podobne znaczenie będzie poniżej, prognozy warunkującego wystąpienie katastrofy. Niestety,

nie są znane proste metody określania wartości krytycznej parametru w innych lokalizacjach obszaru. Również przyczyny gwałtownego wzrostu parametru mogą być różne i niekoniecznie wiązać się ze zjawiskiem wywołującym katastrofę. Poprawy efektywności metody, należy upatrywać w określeniu, na podstawie długotrwałej obserwacji, korelacji pomiędzy wartością śledzonego parametru, a pojawianiem się zjawisk o charakterze katastroficznym [38], [39].

*Metoda bezwymiarowych współczynników względnych* ocenia wartości złożonych współczynników, określanych na bazie zbioru charakterystyk środowiskowych, uprawdopodobniających wystąpienie katastrofy. W najprostszym przypadku, metoda ta jest modyfikacją poprzedniej i wykorzystuje relacje pomiędzy aktualną wartością parametru, a jego maksymalnym, zarejestrowanym znaczeniem. Możliwe jest również użycie współczynnika bezwymiarowego, określanego za pomocą wyrażenia matematycznego, opartego na zbiorze wybranych parametrów środowiska lub śledzonego obiektu. Obecnie, metody te są wykorzystywane rzadko, w szczególności nie są one stosowane w badaniach analitycznych. Znacznie lepszym rozwiązaniem okazuje się śledzenie bezwymiarowych różniczkowalnych funkcji zmiany badanego czynnika. Podejście takie, zapewnia dodatkowo śledzenie charakteru i tempa zmian współczynników [38], [41].

Aktualnie, z uwagi na ogólnodostępność funkcjonującego w czasie rzeczywistym monitoringu środowiskowego, szerokie zastosowanie znajdują *instrumentalne metody prognozowania*. Swoje funkcjonowanie opierają one na szerokim zastosowaniu wielopoziomowego monitoringu fizycznych, chemicznych i biologicznych parametrów środowiska, których zmiany sugerowałyby możliwość pojawiania się zagrożenia. Współczesne technologie monitoringu obejmują: śledzenie stanu środowiska oraz krytycznych obiektów; gromadzenie, przetwarzanie i ocenę informacji o charakterystykach zagrożeń naturalnych i technologicznych; technologie ekspertowo-analityczne [8], [20]. Chociaż metody instrumentalne są szeroko wykorzystywane i powszechnie uważane za jedne z najskuteczniejszych, pozwalają one opracowywać wyłącznie prognozy dla obszarów objętych monitoringiem. Z uwagi na znaczące koszty realizacji, pokrycie monitoringiem wszystkich zagrożonych stref jest niemożliwe i systemy prognozowania tego typu mają ograniczony obszar działania.

Sposobem na poprawę trafności prognoz jest jednoczesne wykorzystanie kilku metod, opierających się na różnych danych wejściowych. Podejście to wykorzystuje *kompleksowa metoda szacowania*, która opiera się na następujących założeniach:

1. Każda z wykorzystywanych metod powinna rozróżniać i akceptować obiekt, dla którego tworzone będą prognozy;
2. Różne metody powinny dostarczać różnych informacji o badanym obiekcie;
3. Zwiększenie w zestawie liczby metod wykorzystujących różną podstawę fizyczną, zapewnia poszerzenie informacji o jakościowych charakterystykach obiektu;

4. Zwiększanie w zestawie liczby metod o tej samej podstawie fizycznej poprawia rozdzielczość metody złożonej, w odniesieniu do badanych obiektów.

Zaletą metod tej grupy jest heterogeniczność prognozowania zagrożeń: są one oceniane na podstawie wielu różnorodnych czynników, co bezsprzecznie poprawia trafność prognoz. Wspomniana heterogeniczność postrzegana jest również jako istotna wada. Zarzuca się im brak systematyzacji procesu analizy zagrożeń, szczególnie w przypadku, kiedy badany jest wpływ wielu czynników posiadających różną naturę fizyczną, ale działających na obiekt jednocześnie. Nie zawsze pozwalają one zrozumieć i uwzględnić mechanizmy rozwoju zagrożenia. Z tego i kilku innych powodów uważa się, że metody te znajdują się w początkowej fazie rozwoju. Ich doskonalenie wymaga dogłębnego zrozumienia relacji pomiędzy różnymi typami zagrożeń, co jest zadaniem wyjątkowo skomplikowanym, wymagającym całościowych badań ekosystemu.

Szczególnym przypadkiem prognozowania zagrożeń w zawężonej czasoprzestrzeni jest *analiza ryzyka* [20], [35]. Do poprawy wiarygodności prognoz, wykorzystuje ona praktycznie wszystkie znane metody monitoringu środowiskowego oraz analityczne techniki prognozowania. Ich dokładność, w pierwszej kolejności, zależy od kompletności uwzględnienia czynników wpływających na zaistnienie i przebieg katastrofy. W odróżnieniu od tradycyjnych metod szacowania ryzyka, w tym przypadku, uwzględnia się wszystkie wzajemne powiązania pomiędzy środowiskiem naturalnym, technologicznym i socjalnym. Metodyka analizy ryzyka, może być realizowana na bazie poniższych trzech podejść:

1. Podejścia *probabilistyczno-statystycznego*, wykorzystywanego w prognozowaniu długoterminowym na podstawie wieloletniej analizy częstotliwości występowania katastrof;
2. Podejścia *probabilistyczno-deterministycznego*, przygotowującego prognozy średnioterminowe oparte na wieloletnich obserwacjach środowiska, ustalonych wcześniej przestrzenno-czasowych prawidłowościach przebiegu zjawisk oraz ich cykliczności;
3. Podejścia *deterministyczno-probabilistycznego*, stosowanego do określania prognoz krótkoterminowych, w oparciu o pojawiające się zwiastuny.

Metody tej grupy posiadają wszystkie wady metod opartych na statystyce i cykliczności zjawisk. Podstawowym problemem jest tutaj dobór właściwych rozkładów wielkości losowych, których zmiana tworzy podlegające ocenie ryzyko. Innym problemem jest wysoki poziom nieokreśloności badanych zjawisk, wynikający, przede wszystkim, z niekompletności posiadanych informacji. Obecnie, obserwujemy stopniową zmianę paradygmatu badań i przejście ich na jakościowo nowy poziom, bazujący na technologiach informacyjnych, telemetrii i modelowaniu matematycznym. Powyższe nauki stosowane stanowią podstawę interdyscyplinarnego systemu wiedzy o dynamice nieliniowych systemów złożonych [39], [40].

Ostatnią analizowaną metodą prognozowania jest zastosowanie *matematycznej teorii katastrof*, będącej działem matematyki opartym na modelowaniu matematycznym nieodwracalnych procesów, przebiegających w nieodwracalnym czasie fizycznym. Najważniejszymi jej elementami są: teoria bifurkacji równań różniczkowych oraz teoria osobliwości odwzorowań gładkich. Czasami MTK jest nazywana teorią morfogenezy lub teorią przejść nieciągłych. Wykorzystanie teorii katastrof do prognozowania jest mało praktyczne, do tego celu znacznie lepiej nadają się opisane wcześniej specjalizowane metodyki, bazujące na różnych dziedzinach nauki, w tym również i na samej teorii katastrof. Szczególne znaczenie, MTK odgrywa w obszarze terminologicznym i klasyfikacyjnym. Jej zastosowanie pozwala ujednoczyć aparat pojęciowy oraz formalnie sklasyfikować znane zagrożenia [26], [27], [28].

#### 4. Podsumowanie i dalsze prace

Jednym z najważniejszych zadań stojących przed współczesnymi badaniami nad katastrofami jest maksymalizacja skuteczności prognozowania, która, szczególnie dla prognoz średnio- i długoterminowych, jest obecnie niesatysfakcjonująca. Nie da się jej osiągnąć bez radykalnej zmiany metodyki monitorowania obiektów i środowiska. W szczególności, konieczne jest szerokie zastosowanie sieci sensorowych i nowych typów czujników pomiarowych, pozwalających wykonywać w czasie rzeczywistym pomiar większości istotnych parametrów środowiska. Zastosowania sieci sensorowych do monitorowania zagrożeń nie ograniczają się wyłącznie do danej grupy zjawisk. Przydatność tych rozwiązań do obserwacji, przewidywania przebiegu oraz ostrzegania ludności o niebezpieczeństwie dotyczy wszelkich zjawisk, których występowanie może być mierzone, a wyniki pomiarów przesyłane na odległość. Unifikacji, podobnej do tej wykorzystywanej już w sieciach transmisyjnych, bazujących na standardzie IEEE 802.15, wymagają także metody i środki przetwarzania danych pomiarowych oraz formy prezentacji wyników.

Przeprowadzone badania pokazały, że w procedurach prognozowania, nie w pełni wykorzystywane są zwiastuny pojawiania się katastrof. Obecnie, ich zastosowanie, ma w dominującym stopniu charakter intuicyjny i niezbędne jest opracowanie formalnych podstaw ich klasyfikacji i wykorzystania w procesie prognozowania.

Prognozowanie i przeciwdziałanie katastrofom, dotyczy obecnie szerokiego spektrum działań, obejmujących rozwiązanie problemów z obszaru nauk ścisłych i stosowanych, szkoleń, zarządzania kryzysowego i problemów geopolitycznych włączających opracowanie i wdrożenie nowych przepisów prawa międzynarodowego. Tylko podejście interdyscyplinarne zapewni osiągnięcie satysfakcjonujących rezultatów. Temu właśnie poświęcone są dalsze badania autorów.



## Bibliografia

- [1] M. Żuber, Red., Katastrofy naturalne i cywilizacyjne, Wrocław: Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Łądowych, 2006.
- [2] В. И. Арнольд, Теория катастроф, III red., Москва: Наука, 1990.
- [3] A. Woodcock and M. Davis, Catastrophe theory, Toronto: Clarke, Irwin & Company Limited, 1978.
- [4] L. Davis, Natural Disasters, II ed., New York: Facts On File, 2009.
- [5] I. V. Nemchinov, Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects, V. V. Adushkin, Red., Dordrecht: Springer, 2008.
- [6] A. M. Gunn, Encyclopedia of Disasters: Environmental catastrophes and human tragedies, Westport: GREENWOOD PRESS, 2008.
- [7] D. Morris and E. McGann, Catastrophe, Pymble: HarperCollins Publishers, 2009.
- [8] J. F. Lancaster, Engineering Catastrophes Causes and Effects of Major Accidents, III ed., Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [9] Всемирный банк и Организация Объединенных Наций, Стихийные бедствия и техногенные катастрофы. Превентивные меры, Washington: The United Nations, The World Bank, 2012.
- [10] Е. М. Бабосов, Катастрофы социологический анализ, Минск: Наука и Техника, 1995.
- [11] Z. W. Kundzewicz i P. Matczak, Zagrozenia naturalnymi zdarzeniami ekstremalnymi", *Nauka*, pp. 77-86, 2010.
- [12] J. Ingleton, Red., Natural Disaster Management, Leicester: Tudor Rose, 1999.
- [13] Л. И. Маневич, „О теории катастроф,” *Соровский Образовательный Журнал*, pp. 85-90, 2000.
- [14] P. W. Michor, Elementary catastrophe theory, Timisoara: Universitatea Din Timisoara, 1985.
- [15] Т. Постон и И. Стюарт, Теория катастроф и ее приложения, Москва: Мир, 1980.
- [16] A. Woodcock and T. Poston, A Geometrical Study of the Elementary Catastrophes, Berlin: Springer-Verlag, 1973.
- [17] A. Jarominiak i A. Rosset, Katastrofy i awarie mostów, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1986.
- [18] M. Cheffena, „Industrial wireless sensor networks channel modeling and performance evaluation”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, nr 1, pp. 1-8, 2012.
- [19] L. N. Medford-Davis i B. G. Kapur, „Preparing for effective communications during disasters lessons from a World Health Organization quality improvement project”, *International Journal of Emergency Medicine*, nr 7:15, pp. 1-7, 2014.
- [20] P. Grossi and H. Kunreuther, Catastrophe Modeling: A New Approach to Managing Risk, New York: Springer, 2005.
- [21] G. Woo, The mathematics of natural catastrophe, Danvers: Imperial College Press, 1999.
- [22] C. Photopoulos, Managing Catastrophic Loss of Sensitive Data. A Guide for IT and

Security Professionals, Burlington: Syngress, 2008.

- [23] D. Johnston, „The role of multidisciplinary research and collaboration for improving the resilience of communities to volcanic risk”, *Journal of Applied Volcanology*, nr 1, p. 1, 2012.
- [24] C. S. Wasson, *System Analysis, Design, and Development: Concepts, Principles, and Practices*, New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.
- [25] R. B. Northrop, *Introduction to Complexity and Complex Systems*, New York: CRC Press, 2010.
- [26] C. Brown, *Chaos and Catastrophe Theories*, Thousand Oaks: Sage Publications, Inc., 1995.
- [27] V. I. Arnold, *Catastrophe Theory*, II ed., Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [28] Y. C. Lu, *Singularity Theory and an Introduction to Catastrophe Theory*, New York: Springer-Verlag, 1976.
- [29] В. И. Арнольд, Ньютон и Гук - первые шаги математического анализа и теории катастроф, от эвольвент до квазикристаллов, Москва: Наука, 1989.
- [30] Ю. К. Алексеев і А. П. Сухоруков, Введение в теорию катастроф, Москва: Издательство МГУ, 2000.
- [31] Р. Гилмор, *Прикладная теория катастроф*, т. I, Москва: Мир, 1984.
- [32] Р. Гилмор, *Прикладная теория катастроф*, том I, Москва: Мир, 1984.
- [33] R. D. Sagarin і T. Taylor, „Natural security how biological systems use information to adapt in an unpredictable world”, *Security Informatics*, nr 1:14, pp. 1-9, 2012.
- [34] A. e. al., „A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record”, *Journal of Applied Volcanology*, nr 2, pp. 1-24, 2013.
- [35] E. V. Leary, Red., *Earthquakes Risk, Monitoring and Research*, New York: Nova Science Publishers, Inc., 2009.
- [36] C. S. Desai і M. Zaman, *Advanced Geotechnical Engineering. Soil - Structure Interaction Using Computer and Material Models*, Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [37] M. Randolph і S. Gourvenec, *Offshore Geotechnical Engineering*, Abingdon: Spon Press, 2011.
- [38] N. Ghafoori, Ed., *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, Leiden: CRC Press, 2010.
- [39] M. Hori, *Introduction to Computational Earthquake Engineering*, London: Imperial College Press, 2006.
- [40] R. W. Day, *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*, II ed., New York: McGraw Hill, 2012.
- [41] J. L. Briaud, *Introduction to geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils*, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013.