

Piotr Werner

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,
Pracownia Systemów Informacji Przestrzennej
e-mail: peter@uw.edu.pl

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA LOGIKI ROZMYTEJ I ZINTEGROWANEGO PODEJŚCIA DO BADAŃ ZMIENNOŚCI PRZESTRZENNEJ WRAŻLIWOŚCI NA ZAGROŻENIA NATURALNE

**Integrated Fuzzy Approach to Spatial Differentiation
of Vulnerability to Natural Hazards**

Słowa kluczowe: zagrożenia naturalne, logika rozmyta, wrażliwość społeczna, metodyka
Key words: natural hazards, fuzzy logic, social vulnerability, methods

WPROWADZENIE

Zagrożenia naturalne często utożsamia się z naturalnymi zjawiskami ekstremalnymi. Pojęcie ‘zagrożenie naturalne’ odnosi się jednak do sytuacji poprzedzającej wystąpienie zjawisk ekstremalnych i wyraźnie odróżnia się od stanu klęski żywiołowej (Lisowski 1993), który ma już miejsce. W teorii gier wyróżnia się klasę gier przeciwko naturze, w których element losowości i niepewności jest na tyle duży, że rozpatrując problem w krótkim przedziale czasu, nie sposób jest opracować rozsądnej strategii postępowania (Straffin 2004, s.74). Próby rozwiązania tej sytuacji mogą obejmować (teoretycznie) przypisanie równego prawdopodobieństwa wystąpienia wszystkim możliwym sytuacjom (braku lub pewności wystąpienia). Inna strategia polega na przyjęciu postawy pesymistycznej, zakładającej pewność wystąpienia danej katastrofy naturalnej. Jej przeciwieństwem jest postawa optymistyczna, wiary w korzystny zbieg uwarunkowań, skutkujących brakiem katastrofy naturalnej (w skrajnym przypadku tą postawę można wiązać z nieświadomością zagrożenia). Odmienne postępowanie dotyczy sytuacji samoadaptacji zachowania ludzi, na skutek wystąpienia już w przeszłości danego zjawiska ekstremalnego i zmiany strategii zachowania stosownie do zmiany sytuacji. Opisana sytuacja odnosi się do podejmowania decyzji i działań w warunkach niepewności (Straffin 2004, s. 77). W skrajnym przypadku, ta zmiana strategii może prowadzić do wyboru jednej z wcześniej opisywanych postaw: optymistycznej, pesymistycznej i ambiwalentnej.

Opisane sytuacje odnoszą się oczywiście do teoretycznej sytuacji jednej lokalizacji i (grupy) ludzi, zakładając zmienność czasową opisywanych postaw i zjawisk. W badaniach geograficznych nakłada się również zjawisko zróżnicowania przestrzennego zarówno zjawisk jak i grup ludzi, tj. nierównomierność występowania klęsk żywiołowych i określonych postaw, zachowań ludzi (strategii działania) w czasie i przestrzeni. W tym dyskursie abstrahowano od sytuacji w trakcie klęski żywiołowej zakładając, że wprawdzie nadal jest to zagrożenie dla zdrowia, życia i mienia ludzi, ale w tym przypadku podejmowane są wyjątkowe, niekiedy wymuszone zaistniałymi zbiegami okoliczności procedury, jak np. masowa ewakuacja lub wysadzanie wałów przeciwpowodziowych, odmiennie od prowadzonych (niekiedy permanentnie) działań a priori, utrwalających odporność i przygotowujących ludzi do potencjalnej katastrofy naturalnej, jak np. magazynowanie żywności, planowanie dróg ewakuacji i miejsc zbiórki, logistyki zespołów ratowniczych czy organizacja funduszy pomocowych. W tym kontekście opisana sytuacja podejmowania decyzji w warunkach (zróżnicowanej) niepewności opisuje stan zagrożenia naturalnego, w przypadku świadomości, że zjawiska ekstremalne miały miejsce w dalszej lub bliższej przeszłości.

Taki opis stanu wyjściowego badań, zróżnicowania czasowo-przestrzennego i nieznanego prawdopodobieństwa zaistnienia zjawisk jest najbliższy opisowi formalnemu logiki wielowartościowej. W tym kontekście należy rozpatrywać badane zjawiska z różnych punktów widzenia: biorąc pod uwagę z jednej strony poziom formalnej (naukowej) wiedzy ludzi bądź ich doświadczenie, związane z liczbą zjawisk ekstremalnych, które bezpośrednio ich dotknęły w przeszłości, a więc wiedzy ukrytej. „Rdzenni mieszkańcy obszarów ciągle zagrożonych klęskami żywiołowymi (zwykle) rozpoznają miejsca i obszary eksponowane na ekstremalne zjawiska naturalne, podatność fizyczną obszarów i środowiska przyrodniczego, dysponując zarówno wiedzą o swoim obszarze, jak i doświadczeniami osobistymi i społecznymi, przekazywanymi z pokolenia na pokolenie, wzmacniając tym samym swoją zdolność radzenia sobie ze skutkami potencjalnych klęsk żywiołowych” (Werner i in. 2014). Ponieważ ocena świadomości zagrożeń naturalnych ludności wymagałaby szerokich badań ankietowych, przyjęto, że pewne grupy ludności cechuje ograniczona zdolność reakcji i jest ona skorelowana z uwarunkowaniami społecznymi i ekonomicznymi.

Inny wymiar to faktyczna ocena narażenia na zjawiska ekstremalne, która może być oceniona statystycznie na podstawie np. liczby, intensywności i zasięgu naturalnych zjawisk ekstremalnych występujących w przeszłości, tworząc pewną skalę stopnia zagrożenia występowaniem ekstremalnych zjawisk naturalnych względem innych miejsc. W ten sposób tworzą się dwa odrębne wymiary reprezentujące z jednej strony narażenie (ekspozycję) a z drugiej podatność społeczno-ekonomiczną na zagrożenia naturalne i stanowiąc punkt wyjścia do konstrukcji zmiennych lingwistycznych, które można scharakteryzować kategoriami logiki wielowartościowej.

LOGIKA WIELOWARTOŚCIOWA

Zmienne lingwistyczne (językowe) opisane mianem wiedzy ukrytej o zagrożeniu lub (intuicyjnej) świadomości możliwości wystąpienia naturalnego zjawiska o charakterze ekstremalnym można opisać przymiotnikami „nieoczekiwane” lub „możliwe”. Wszystkie inne sytuacje można skategoryzować logicznie jako pewne (prawda) lub niemożliwe (fałsz). Konstrukcja zmiennych lingwistycznych obejmuje w takim przypadku zbiór następujących kategorii, na krańcach skal obydwu rozpatrywanych wymiarów - podatności społecznej i ekspozycji (por. tab. 1, inspiracja za Kundzewicz i in. 2010 - za Rumsfeld 2002):

- Pewność co do wystąpienia oczekiwanego naturalnego zjawiska ekstremalnego i względna wiedza (formalna, naukowa) o jego rodzaju, lokalizacji, skali, nasileniu i czasie – w skrócie: względnie rozpoznanie zagrożenie (ZPZ – znane pewne /oczekiwane/ zagrożenie, np. powódzie roztopowe, ‘*known knowns*’, KK),
- Brak wiedzy o możliwości wystąpienia nieoczekiwanego naturalnego zjawiska ekstremalnego, które wcześniej nie miało miejsca w tym miejscu – w skrócie: nieznanie nieoczekiwane (niepewne) zagrożenie (NNZ, ‘*unknown unknowns*’, UU)¹,
- Niepewność co do rodzaju, lokalizacji, skali, intensywności i czasu wystąpienia rozpoznanych i zaistniałych już wcześniej ekstremalnych zjawisk naturalnych – w skrócie: znane niepewne (prawdopodobne) zagrożenie (ZNZ, np. susze, ‘*known unknowns*’, KU),
- Brak pewności o możliwości wystąpienia, rodzaju, lokalizacji, skali, intensywności i czasu wystąpienia zjawisk o charakterze losowym, które jednak znane są z przeszłości – w skrócie: nieoczekiwane (niepewne) znane zagrożenie (NZZ, np. opady gradu, ‘*unknown knowns*’, UK)
- Świadomość możliwości wystąpienia zjawiska ekstremalnego pomimo braku przesłanek o jego prawdopodobnym wystąpieniu – w skrócie: nieoczekiwane prawdopodobne zagrożenie (NPZ, np. pożary lasów, ‘*tacit intuitive*’, TI).

W tym kontekście do oceny powyższych zmiennych lingwistycznych można zastosować logikę trójwartościową (3VL) wykorzystując logikę operacji Heytinga-Kleene-Lukasiewicza, w której wartość $\frac{1}{2}$ opisuje się i rozumie jako wartość „jeszcze nie wiadomo”. Wyróżnione wyżej zmienne lingwistyczne (językowe) mogą opisywać różne sytuacje mające miejsce w różnych miejscach i mogą być produktem dwóch wymiarów reprezentujących: zróżnicowanie przestrzenne wybranych zagrożeń naturalnych i poziom podatności społeczeństwa na te zagrożenia (który może być rozumiany jako dojrzałość społeczeństwa bądź stopień przygotowania na zagrożenie).

¹ Np. wg doniesień portali internetowych: “A MASSIVE explosion on the surface of the sun could happen at any moment resulting in power cuts and communication blackouts” /ogromna eksplozja na powierzchni Słońca może w każdym momencie spowodować odcięcie zasilania, blokadę komunikacji i zaciemnienie/; źródła: <http://www.express.co.uk/news/nature/527134/Sun-spot-solar-superstorm-threat-global-blackout-communications>, <https://metofficeneeds.wordpress.com/2014/10/23/met-office-monitors-giant-sun-spot/> (pozyskano 12/12/14).

Zrozumienie zagrożenia przez społeczeństwa (świadomość zagrożenia) można oszacować pośrednio poprzez ocenę danych historycznych i inwentaryzację ekstremalnych zjawisk naturalnych. Większa częstotliwość lub intensywność klęsk żywiołowych jest pozytywnie skorelowana ze świadomością zagrożenia ludzi zamieszkujących daną przestrzeń geograficzną. Stosowaną metodyką i kanonem postępowania naukowego jest prezentacja zróżnicowania przestrzennego podatności przestrzeni fizycznej na ekstremalne zjawiska naturalne najczęściej w układzie jednostek w skali topograficznej. W przypadku braku lub niepełnych danych przestrzennych dokonuje się zwykle analizy uwarunkowań potencjalnych możliwości występowania ekstremalnych zjawisk naturalnych i traktuje jako komplementarne w analizie ryzyka. Ocena poziomu podatności społecznej zakłada korelację wyższej świadomości zagrożenia klęskami żywiołowymi z wyższą odpornością (mniejszą podatnością) na danym obszarze.

Tabela 1. Zmienne lingwistyczne w analizie logiki trójwartościowej wrażliwości na zagrożenia naturalne

Table 1. Linguistic variables of three-values logic (3VL) of analysis of vulnerability to natural hazards

Zmienna lingwistyczna		Wiedza o klęskach żywiołowych i zagrożeniach naturalnych		
		Brak	Ukryta	Formalna
Świadomość zagrożenia naturalnego – zjawiskiem ekstremalnym	Brak	NNZ (UU) nieznane nieoczekiwane zagrożenie	...	ZNZ (KU) znane nieoczekiwane (prawdopodobne) zagrożenie
	Intuicyjna	...	NPZ (TI) nieoczekiwane prawdopodobne zagrożenie	...
	Istotna, pełna	NZZ (UK) niepewne znane zagrożenie	...	ZPZ (KK) znane pewne / oczekiwane/ zagrożenie

WRAŻLIWOŚĆ SPOŁECZNA

Wrażliwość społeczna (*vulnerability*) jest tematem licznych rozważań teoretycznych i badań stosowanych. Zagadnienie rozważa się w dwóch płaszczyznach: teoretycznej oraz praktycznej, poprzez wybór mierników charakteryzujących zjawisko podatności, pozwalających dokonywać jego oceny (Werner i in. 2014). Aspekt społeczny obejmuje m.in. takie cechy ludności jak struktura demograficzna,

alfabetyzacja i inne. Złożony (syntetyczny) miernik wrażliwości społecznej jest produktem wymienionych wyżej wymiarów: ekspozycji i podatności społecznej (ryc. 1).



Ryc. 1. Zakres wrażliwości społecznej na zagrożenia naturalne
Fig. 1. Concept of social vulnerability to natural hazards

Określenie liczbowe granic rozdzielających przedziały grupowania równocześnie dla obu rozpatrywanych wymiarów nie jest możliwe z dostateczną precyzją, gdyż może mieć miejsce wiele różnych stanów pośrednich o złożonej konfiguracji. Dlatego do oceny obydwu złożonych zjawisk należy zastosować właściwe narzędzie, tj. w tym przypadku metody logiki rozmytej (Zadeh 1975), która jest formalnym narzędziem reprezentacji niepewnej (niedostatecznie precyzyjnej) informacji świata rzeczywistego i może punktem wyjścia do reprezentacji numerycznej badanych zjawisk. Wg teorii logiki rozmytej metodyka postępowania obejmuje szereg kroków prowadzących do oszacowania przybliżonego prawdopodobieństwa (możliwości przynależności do określonej klasy). Są to procedury: rozmywania (*fuzzification*), definiowania (*knowledge base and decision-making logic*) oraz ponownego oszacowania prawdopodobieństwa (wyostrzania, *defuzzification*; Lee 2005).

Etap rozmywania polega na transformacji precyzyjnie zdefiniowanych wartości liczbowych zmiennych wejściowych do postaci zmiennych lingwistycznych, tj. konwersji danych do postaci zbiorów rozmytych. Następne etapy związane są z podejmowaniem decyzji (wg wcześniej określonych reguł) i zastosowania reguł logiki rozmytej i polegają na ocenie zjawiska tzn. przypisaniu określonych, wcześniej zdefiniowanych zmiennych lingwistycznych. Ostatni etap (wyostrzania, *defuzzification*) dotyczy skalowania spektrum zmiennych lingwistycznych (językowych) i ich interpretacji w całości dyskursu rozpatrywanego problemu (*ibid.*).

Pojęcie 'zagrożenie naturalne' implikuje stan poprzedzający klęskę żywiołową (Lisowski 1993). Aspekt odnoszący się do świadomości zagrożeń naturalnych (ekspozycji) może być reprezentowany poprzez ocenę intensywności (lub częstotliwości) i zasięgu przestrzennego klęsk żywiołowych, które miały miejsce w przeszłości. Ta zmienna może być zoperacjonalizowana i wyrażona jako prawdopodobieństwo lub ryzyko klęski żywiołowej (tj. ocena ilościowa ekspozycji na zagrożenie naturalne). Drugi wymiar opisuje z kolei uwarunkowania społeczne, które wpływają na podatność ludzi i miejsc na zagrożenia naturalne (Gall 2007). Specjaliści zajmujący się klęskami żywiołowymi, jak również geografowie, socjologowie,

specjaliści psychologii środowiska i inni wskazują na istnienie wielu wymiarów tego aspektu wrażliwości na zagrożenia naturalne, wynikających m.in. uwarunkowań lokalizacji (miejsca zamieszkania), podatności (społeczno-ekonomicznej), odporności i zdolności samoadaptacji (organizacyjnej lub systemowej; Villagrán de León 2006).

Formalna ocena ryzyka ekstremalnych zjawisk naturalnych bierze pod uwagę splot ekspozycji na zagrożenia naturalne i podatności (Bankoff i in. 2004):

$$V = (Ex \cdot S) / Cc \quad (1)$$

V – wrażliwość (*vulnerability*), Ex – ekspozycja (*exposure*), S – susceptibility (podatność), Cc – *coping capacity* (samoadaptacja i zdolność samorganizacji).

W badaniach geograficznych podatności na zagrożenia naturalne z reguły opisyje się za pomocą szeregu specyficznych cech zjawisk naturalnych i społeczno-ekonomicznych odnoszących się do wybranego regionu (jednostki przestrzennej badania) i wyraża się za pomocą złożonych mierników, osobno dla różnych rodzajów zagrożeń. Całościowe ujęcie przestrzenne oceny wrażliwości na zagrożenia naturalne, stanowiące element szacowania ryzyka, obejmuje wiele złożonych czynników środowiskowych i społecznych i prezentowane jest w wielu publikacjach (Nelson 2013, Gall 2007, Cutter i in. 2003). Szczegółowe badania zagrożenia trzęsieniami ziemi czy osuwiskami wykorzystujące także teorie logiki rozmytej (Lin i in. 2012, Gorsevski i in. 2005) dotyczą jednak małych obszarów i prowadzone są w skali topograficznej.

Wybór adekwatnych kryteriów oceny wrażliwości oznacza takie zdefiniowanie zbioru zmiennych opisujących grupy ludzi i infrastrukturę, która reprezentuje podatność na zagrożenia naturalne. Część cech odnosi się do obszarów (regionów) gdzie nie przeciwdziała się ekstremalnym zjawiskom naturalnym. W tym przypadku podatność społeczną można opisać wykorzystując cechy przestrzenne infrastruktury, organizację systemu ubezpieczeniowego, metody planowania strategicznego kompensacji strat oraz dostępność transportową (która oddziałuje na podatność). Następnym podzbiorem cech dotyczy ludności i opisuje postawy wobec zagrożeń naturalnych (negacja, ignorowanie, poczucie bezpieczeństwa i samokontroli). Ta grupa zmiennych (nie badana dotychczas w Polsce) skorelowana jest często z wielkością jednostek osadniczych i miast (Biernacki 2009). Trzeci podzbiór cech jest związany z nabytą (w szkole, poprzez media lub własne doświadczenie) wiedzą dotyczącą zachowań i reakcji wobec zagrożeń naturalnych. Ostatnia, czwarta grupa cech opisuje strukturę demograficzną. Największą podatnością cechują się najmniej mobilne grupy ludności, np. ludzie starsi czy dzieci. Również podopieczni ośrodków pomocy społecznej lub opieki zdrowotnej są grupą o zwiększonej podatności na zagrożenia naturalne.

Wymiar (aspekt) świadomości zagrożenia naturalnego ludzi wynikającego z ekspozycji na możliwe ekstremalne zjawisko naturalne reprezentowany jest przez złożony wskaźnik skonstruowany na podstawie opisu wynikającego ze zmiennej

lingwistycznej, biorąc pod uwagę wybrane cechy fizycznogeograficzne warunkujące jego wystąpienie, takie jak np. zasięg, intensywność lub częstota.

Do oceny ryzyka zagrożeń naturalnych dobiera się różne zmienne i konstruuje mierniki wrażliwości społecznej często korzystając z wskaźników opisujących poziom rozwoju społeczno-ekonomicznego. Lista zmiennych branych pod uwagę przy ocenie podatności społecznej na zagrożenia naturalne (w tym epidemii) jest rozpoznana (Gall 2007)². Wymiar (aspekt) wiedzy o zagrożeniu naturalnym zjawiskiem ekstremalnym można ocenić stosując lokalny współczynnik rozwoju społecznego w Polsce. „Lokalny Wskaźnik Rozwoju Społecznego (*Local Human Development Index*, LHDI) to unikatowe badanie rozwoju społecznego Polski na poziomie lokalnym (regiony, powiaty i częściowo gminy) w oparciu o metodologię HDI. Polska została objęta przez UNDP nowatorskim badaniem dotyczącym mierzenia rozwoju społecznego na poziomie lokalnym i regionalnym” (UNDP 2012, LHDI, Arak i in. 2013³). Zakładając, że im wyższy wskaźnik LHDI, tym większa odporność i mniejsza podatność, można wykorzystać jego odwrotność (tzn. dopełnienie do wartości 1), jako miarę podatności.⁴

Założono, że wrażliwość społeczna (SoVI) na wybrane zagrożenia naturalne w Polsce jest produktem ekspozycji /Ex/, tj. narażenia, podatności fizycznej oraz podatności społecznej /S/, których znormalizowane wartości skalowane są w przedziale $<0,1>$. Wyróżniono sześć różnych scenariuszy wrażliwości społecznej (SoVI), możliwych produktów ekspozycji oraz podatności społecznej dających w efekcie wskaźnik wrażliwości społecznej (Werner i in. 2014), zakładając równocześnie, że zdolność radzenia sobie (samoadaptacji, *coping capacity*, $Cc=1$) jest stała.

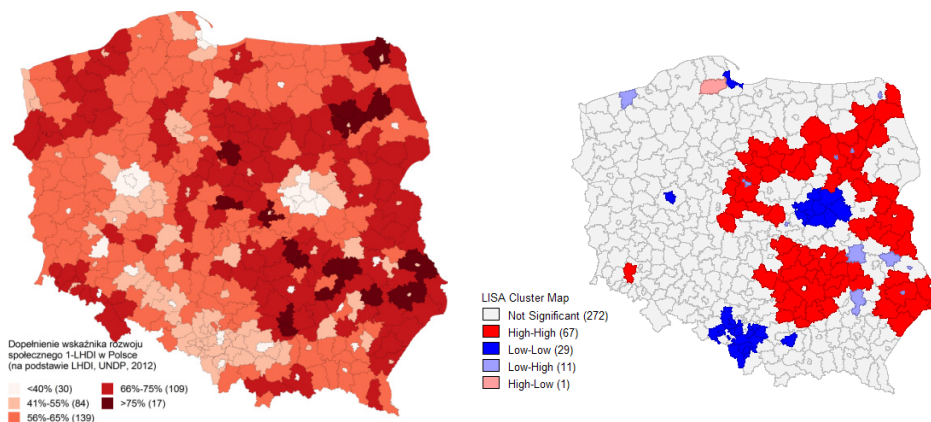
SCENARIUSZE – MODELE WRAŻLIWOŚCI SPOŁECZNEJ NA ZAGROŻENIA NATURALNE

Sześć wyjściowych scenariuszy splotu ekspozycji i podatności społecznej na wymienione zagrożenia (zmienne lingwistyczne), zakłada, że poszukiwana wrażliwość społeczna na zagrożenia naturalne może być oszacowana jako funkcja gęstości o odmiennych własnościach (ryc. 3).

² M.in. EVI Environmental Vulnerability Index (Kalyi et al. 1999, SOPAC 2005), ESI Human Vulnerability Component of the Environmental Sustainability Index (Esty et al. 2005), HDI Human Development Index (UNDP 1990; 2005; Burd-Sharps et al. 2008, 2009), HWI Human Wellbeing Index (Prescott-Allen 2001), PVI Prevalent Vulnerability Index, SVA Index of Social Vulnerability to Climate Change for Africa, DRI Disaster Risk Index i PIV Predictive Indicator of Vulnerability (Gall 2007)

³ <http://undp.iq.pl/eng/What-we-do/Human-Development-Research/Local-Human-Development-Index> [access: January 29, 2014]

⁴ „Najprostszy, a zarazem najpopularniejszy systemem logiki rozmytej jest system, w którym negację definiuje się jako dopełnienie, koniunkcję jako minimum dwóch wartości, a alternatywę jako maksimum dwóch wartości” (Januszewski 2007)



Współczynnik autokorelacji przestrzennej I Moran $r=+0,375$ i znaczące skupiska różnych typów autokorelacji przestrzennej

Ryc. 2. Interpretacja przestrzenna dopełnienia lokalnego wskaźnika rozwoju społecznego jako zmienności wrażliwości społecznej wg powiatów w Polsce (na podstawie Local HDI, UNDP,2012)

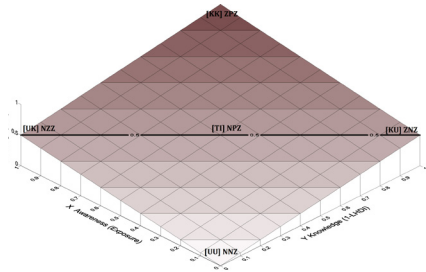
Fig. 2. Spatial interpretation of complementary fraction up to one of Local Human Development Index as measure of social vulnerability by counties in Poland (based on UNDP 2012)

Splot ekspozycji i podatności społecznej tworzy matematyczny, teoretyczny wykres trzech zmiennych. Na podstawie przedstawionych scenariuszy teoretycznych można wskazać jaka konfiguracja wartości odpowiada zdefiniowanym zmiennym lingwistycznym (językowym), a przedstawienie tych wartości w przestrzeni geograficznej pozwala na ujawnienie zróżnicowania przestrzennego wskaźnika wrażliwości społecznej na dane zagrożenia naturalne.

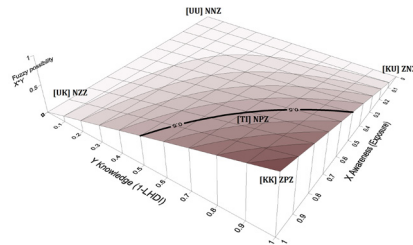
W dalszych etapach można konstruować bardziej złożone zmienne lingwistyczne, które są złożone z wymienionych wyżej podstawowych wyrażeń.

Zakładając hipotetyczną sytuację wystąpienia punktowego ekstremalnego zjawiska naturalnego zagrażającego ludziom i ich mieniu, wygenerowano losowe rozmieszczenie maksymalnie 3000 punktów w granicach Polski, tak aby odległość między nimi nie była mniejsza niż 1km (ArcGIS, *Create Random Points*). Na tej podstawie opracowano mapę średniej ekspozycji powiatów na hipotetyczne zagrożenie, wyrażając je w skali od 0 do 1 dla każdego, gdzie wartość 1 uzyskał powiat o maksymalnej liczbie zliczonych punktów, a następnie skonfrontowano z oszacowaną na podstawie LHDI podatnością społeczną wg założonych scenariuszy. Na ryc. 4 przedstawiono wyniki oceny zróżnicowania przestrzennego hipotetycznego zagrożenia dla podstawowych scenariuszy szacując także ich wskaźniki autokorelacji przestrzennej, dzieląc je na trzy klasy o równej rozpiętości.

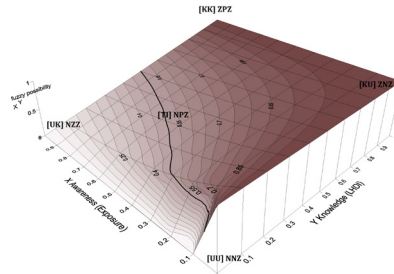
A. Średnia ekspozycji i podatności społecznej: $SoVI = (E+S)/2$



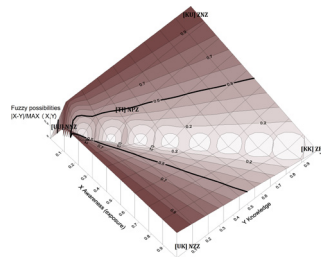
B. Relacja podatności społecznej i ekspozycji: $SoVI = E * S$



C. Intensyfikacja ekspozycji przez podatność społeczną: $SoVI = E^S$



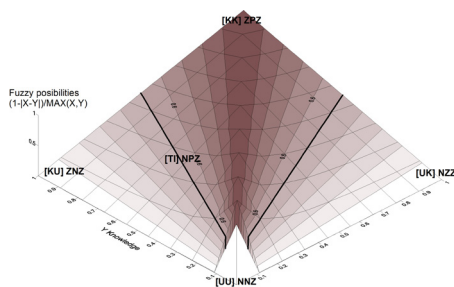
D. Maskowanie podatności społecznej przez ekspozycję: $SoVI = |E-S| / \max(E,S)$



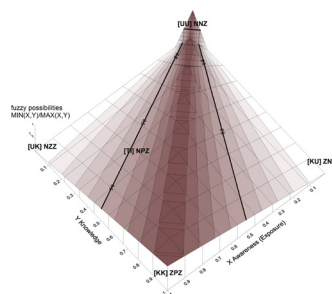
Ryc. 3. Funkcja gęstości wiążąca zmienne lingwistyczne: świadomość (oś Y) i ekspozycja (oś X) na zagrożenia naturalne (NNZ: nieznanne nieoczekiwane zagrożenie, ZPZ: znane pewne (prawdopodobne) zagrożenie, NZZ: niepewne znane zagrożenie, ZNZ: znane nieoczekiwane zagrożenie, NPZ: nieoczekiwane prawdopodobne zagrożenie)*

Fig. 3. Density surfaces of fuzzy possibilities (F) as product of awareness of exposure (X) and knowledge about (susceptibility to) natural hazards (Y). *KK known knowns, UU unknown unknowns, UK unknown knowns, KU known unknowns*

E. Ujawnianie podatności społecznej przez ekspozycję: $SoVI = 1 - |E - S| / \max(E, S)$



F. Obustronne ujawnianie podatności społecznej i ekspozycji: $SoVI = \min(E, S) / \max(E, S)$



Ryc. 3. Funkcja gęstości wiążąca zmienne lingwistyczne: świadomość (oś Y) i ekspozycja (oś X) na zagrożenia naturalne (NNZ: *nieznane nieoczekiwane zagrożenie*, ZPZ: *znane pewne (prawdopodobne) zagrożenie*, NZZ: *niepewne znane zagrożenie*, ZNZ: *znane nieoczekiwane zagrożenie*, NPZ: *nieoczekiwane prawdopodobne zagrożenie*)*

Fig. 3. Density surfaces of fuzzy possibilities (F) as product of awareness of exposure (X) and knowledge about (susceptibility to) natural hazards (Y). KK *known knowns*, UU *unknown unknowns*, UK *unknown knowns*, KU *known unknowns*

gdzie: *SoVI*: *wrażliwość społeczna na zagrożenia naturalne – splot ekspozycji i podatności*, *E*: *ekspozycja*, *S*: *podatność społeczna*.

* Uwaga: w trakcie badań empirycznych i po weryfikacji matematycznej okazało się, że scenariusze E i F są identyczne, choć zmienne lingwistyczne i wzory opisują pozornie różne sytuacje, tzn.

$$1 - \frac{|x - y|}{\max(x, y)} = \frac{\min(x, y)}{\max(x, y)}$$

Klasyczne podejście do analizy zjawiska metodami logiki rozmytej dotyczy zwykle jednej, nieprzestrzennej zmiennej (Zadeh 1975, Lee 2005). W przypadku porównania dwóch zmiennych, które cechują się nierównomiernym rozmieszczeniem w przestrzeni (geograficznej), należy wykorzystywać właściwe narzędzia analizy przestrzennej. Ponadto badane zjawiska z reguły są opisywane złożonymi, kompleksowymi miernikami (tak jak w przypadku dopełnienia LHDI). Zalecane podejście logiki rozmytej jest umiejętne wykorzystanie i interpretacja etapów rozmywania i definiowania w trakcie transformacji zmiennych lingwistycznych

Scenariusz	Zróżnicowanie przestrzenne
A. Średnia: I Moran $r=+0,19$ Equal Intervals: AAVG [0.0156:0.288] (70) [0.288:0.561] (270) [0.561:0.833] (40)	
B. Relacja: I Moran $r=+0,134$ Equal Intervals: BRELREV [0:0.228] (289) [0.228:0.456] (84) [0.456:0.683] (7)	
C. Intensyfikacja: I Moran $r=+0,09$ Equal Intervals: CINT [0:0.333] (127) [0.333:0.667] (227) [0.667:1] (26)	
D. Maskowanie: I Moran $r=+0,07$ Equal Intervals: MASK [0.0104:0.34] (64) [0.34:0.67] (149) [0.67:1] (167)	
E. Ujawnianie: I Moran $r=+0,07$ Equal Intervals: REVEAL [0:0.33] (167) [0.33:0.66] (149) [0.66:0.99] (64)	
F. Obustronne ujawnianie: I Moran $r=+0,07$ Equal Intervals: MINMAX [0:0.33] (167) [0.33:0.66] (149) [0.66:0.99] (64)	

Ryc. 4. Ocena zróżnicowania przestrzennego hipotetycznego zagrożenia wg podstawowych scenariuszy wrażliwości społecznej

Fig. 4. Assessment of spatial differentiation of hypothetical hazard using base models / scenarios/ of social vulnerability

do postaci jednego wyrażenia (scenariusza). W ten sposób w dalszych krokach postępowania można operować tradycyjnymi narzędziami kartograficznymi i statystycznymi.

Podejście chorologiczne prezentacji końcowych wyników analizy zmiennych przestrzennych za pomocą metod logiki rozmytej wykorzystuje narzędzia GIS, co dodatkowo daje możliwość ujawnienia wzorów przestrzennych opisywanych zjawisk.

Operowanie scenariuszami pozwala ponadto na weryfikację pewnych założonych a priori hipotez dotyczących relacji obu badanych zjawisk, jakkolwiek

nawet w prezentowanym przykładzie można znaleźć podobieństwa zróżnicowania przestrzennego różnych scenariuszy. Zintegrowana metodyka postępowania dla różnych zjawisk ekstremalnych pozwala również na ujednoczone podejście, konstrukcję zmiennych w czasie i pod względem doboru analizowanych zjawisk miar i ich ocenę zróżnicowania przestrzennego, zarówno wyników końcowych jak i pośrednich. Istotnym celem jednak jest oszacowanie kompleksowej wrażliwości społecznej na zagrożenia naturalne ujmujące różne zagrożenia (SoVI). Wskaźnik może służyć jako narzędzie oceny ogólnego poziomu zagrożenia ekstremalnymi zjawiskami naturalnymi na badanym obszarze i wspomagać podejmowanie strategicznych decyzji przez uprawnione jednostki i organy władzy, jak również wspomagać rozpoznanie sytuacji i ujawnienie niektórych dokuczliwych zdarzeń o mniejszej skali, które faktycznie stanowią element oddziałujący lokalnie stwarzając realne zagrożenie.

Podziękowania

Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego pt. Zróżnicowanie przestrzenne wrażliwości społeczeństwa informacyjnego na wybrane zagrożenia naturalne w Polsce, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (DEC- 2011/03/B/HS4/04933).

Literatura

- Bankoff G., Frerks G., Hilhorst D., 2004, *Mapping vulnerability disasters, development and people*, Sterling, VA, Earthscan Publications, London.
- Biernacki W., 2009, *Spoleczności lokalne wobec zagrożeń przyrodniczych i klęsk żywiołowych*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Cutter S.L., Boruff B.J., Shirley W.L., 2003, Social Vulnerability to Environmental Hazards, *Social Science Quarterly*, vol. 84, Jun: 242–261.
- Gall M., 2007, *Indices of social vulnerability to natural hazards, a comparative evaluation*, ProQuest.
- Gorsevski P.V., Jankowski P., Gessler P.E., 2005, Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Fuzzy k-means and Dempster-Shafer Theory. *Transactions in GIS*, vol. 9, Oct. no. 4, 455-474.
- Januszewski E., 2007, Logiczne i filozoficzne problemy związane z logiką rozmytą, *Roczn. Filozoficzne*, t. LV, nr.1, 109-128.
- Kundzewicz Z.W., Matczak P., Sadowski Z., 2010, Wprowadzenie do raportu o zagrożeniach, *Nauka*, vol. 4, 11-18.
- Lee K.H., 2005, *First course on fuzzy theory and applications*, New York, Springer-Verlag, Berlin.
- Arak P., Ivanov A., Peleah M., Płoszaj A., Rakocy K., Rok J., Wyszowski K., 2013, National Human Development Report, Poland 2012 Local and Regional Development, UNDP, <http://hdr.undp.org/en/content/local-and-regional-development-poland-2012>. [Accessed 15 Dec. 2013].

- Lisowski A., 1993, *Skutki występowania wybranych zagrożeń naturalnych i ich percepcja w Polsce*, Uniwersytet Warszawski, WGiSR, Warszawa.
- Nelson S.A., 2013, *Natural Disasters & Assessing Hazards and Risk*. http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/introduction.htm. [Accessed, 18 Aug. 2013.].
- Straffin P.D., 2004, *Teoria gier*, Warszawa, Scholar.
- Villagrán J.C. de León, 2006, *Vulnerability, a conceptual and methodological review*, UN University, Institute for Environment and Human Security, Bonn.
- Werner P., Rucińska D., Iwańczak B., 2014, Zróżnicowanie przestrzenne wrażliwości społecznej na wybrane zagrożenia naturalne w Polsce, materiały konferencji: „Społeczno – gospodarcze aspekty bezpieczeństwa Polski. Wyzwania i zagrożenia”, Szkoła Wyższa im. B. Jańskiego, Warszawa, 18.10.2014.
- Lin J-W., Chen C-W., Peng C-Y., 2012, Potential hazard analysis and risk assessment of debris flow by fuzzy modeling. *Nat Hazards*, vol. 64, no. 1, Oct: 273–282.
- Zadeh L.A., 1975, The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, 199–249.

Summary

The scientific aims of the study of natural hazards are the measurement and evaluation of social vulnerability, i.e. choice and estimation of spatial differentiation of the indices of society's vulnerability to identified environmental hazards using the unified methodology of the integrated fuzzy approach. Natural disasters are often identified with extreme natural phenomena. But the concept of a natural hazard, which the latter often carries, can be clearly distinguished from a natural disaster. The results encompass proposition of assessment of the spatial inconsistency of identified, potential environmental hazards and spatial differentiation and conformity of (locations) of vulnerable people and increased vulnerability to identified, potential environmental hazards. The outcomes of the study are results of, rather rarely used, fuzzy logic used to evaluate the vulnerability of society to natural hazards presented using examples from Poland.