

Modelowanie układów społecznych: akceptować czy dyskutować? Czy może nasłuchiwać?

*Bartłomiej Dybiec
Zakład Fizyki Statystycznej,
Instytut Fizyki Teoretycznej UJ*

Wstęp

Układy społeczne zbudowane są z wielu różnych osobników. Pomimo mikroskopowej różnorodności grupy społeczne mogą wykazywać zachowania kolektywne. Socjofizyka [1, 2] stosuje różne koncepcje i modele wywodzące się z fizyki statystycznej w celu opisanie zachowania układów społecznych. Zaproponowano wiele modeli, opisujących powstawanie konsensusu i badających proces uzgadniania opinii, które były badane przez fizyków oraz socjologów. W niniejszym artykule omówię wybrane modele rozprzestrzenienia się informacji oraz uzgadniania opinii.

Ilościowe modelowanie układów społecznych staje się możliwe dopiero po skwantyfikowaniu opinii. Skwantyfikowane opinie pozwalają na zbudowanie formalnych modeli wyboru społecznego [3] poprzez określenie „odległości” między opiniami, a w dalszej kolejności na modelowanie procesu wymiany opinii i ich rozprzestrzeniania. Można założyć, że osobniki o zbliżonych poglądach będą częściej wchodzić ze sobą w interakcje, a osoby mające takie same poglądy (w jakiejś kwestii) można potraktować jako grupę społeczną. Socjofizyka pozwala na badanie dynamiki zachowań społecznych, a w szczególności trwałości i wielkości grup społecznych. Problemy te są szczególnie interesujące dla socjologów i psychologów, a także dla fizyków zajmujących się socjofizyką [4]. Do badania własności układów składających się z wielu podobnych, oddziałujących ze sobą jednostek szczególnie dobrze nadają się narzędzia i metody fizyki statystycznej w połączeniu z automatami komórkowymi [5, 6], modelowaniem agentowym oraz metodami Monte Carlo [7]. Metody te szczególnie chętnie stosuje się w socjofizyce i w obliczeniowych naukach społecznych.

Fizyka statystyczna znajduje zastosowanie w badaniu wielu układów, które typowo nie były obiektem zainteresowań fizyków. Pośród tych układów można wymienić badanie sieci złożonych [8], modeli epidemiologicznych [9] oraz socjofizycznych [1]. Modele sieciowe odgrywają coraz większą rolę w badaniu układów złożonych. Znajdują one naturalne zastosowanie w sytuacjach, gdy układy składają się z wielu jednostek oraz połączeń między nimi. W takich sytuacjach agenci tworzący układ stają się węzłami sieci, a istniejące powiązania między nimi reprezentowane są jako linki [8]. Najprostszą strukturą oddziaływań między osobnikami jest regularna siatka, ale obserwacja realnych układów po-

kazuje, że struktura oddziaływań jest bardziej złożona (sieci typu małego świata i sieci bezskalowe oraz ich kombinacje).

Modele uzgadniania opinii zakładają, że jednostki na postawie dostępnej im informacji podejmują decyzje o zmianie lub zachowaniu dotychczasowej opinii. Odpowiednio wykorzystana lokalna informacja może prowadzić do powstania konsensusu i globalnego porządku, czyli do sytuacji, w której wszystkie osobniki posiadają takie same poglądy. Jeśli przyjmiemy, że osoby posiadające takie same opinie tworzą grupę społeczną, to modele opisujące proces uzgadniania opinii są modelami mogącymi opisywać także powstawanie grup społecznych, rozumianych jako zbiorowość jednostek posiadających taką samą opinię czy stanowisko w określonej kwestii. W rzeczywistych sytuacjach tak jednak być nie musi, ponieważ wspólne stanowisko nie zawsze prowadzi do powstania wyraźnie wyodrębnionej grupy, np. ze względu na błahość kwestii lub inne czynniki niepozwalające na jej powstanie. Dzieje się tak dlatego, że o przynależności do danej grupy decyduje nie tylko zgodność poglądów, ale także ich ranga, tradycja lub inne uwarunkowania społeczno-historyczne. Niektóre z możliwych mechanizmów uzgadniania opinii zostały sformalizowane w postaci modeli opisujących lokalną adaptację istniejących opinii, która w sprzyjających okolicznościach może zostać rozciągnięta na cały układ. Uzgadnianie opinii opisywane jest między innymi przy pomocy modeli wyborcy [10], teorii wpływu społecznego [11], modeli większościowych [12], modeli Sznajdów [13], Deffuanta [14] oraz modeli ograniczonego zaufania [15].

Modele

Modelując układy społeczne zakładamy, że każdy osobnik (agent) jest scharakteryzowany poprzez swój stan, w rozważanych tutaj przypadkach – opinię. W najprostszych sytuacjach zakładamy, że opinia jest zmienną binarną (dwustanową), której różne stany utożsamiamy z dwoma możliwymi wyborami: za/przeciw lub tak/nie. Dzięki temu modele typu Isinga [16] grają szczególnie ważną rolę w teorii układów socjofizycznych [2]. Możliwe jest także dopuszczenie większej liczby stanów, ciągłych opinii, a także utworzenie wielowymiarowych (wektorowych) opinii. Dlatego w bardziej złożonych sytuacjach opinia może być zbiorem binarnych, całkowitych lub ciągłych zmiennych odpowiadających stanowiskom w elementarnych kwestiach. Dzięki temu możliwe jest opisanie skomplikowanych sytuacji, np. takich, w których ta sama jednostka ze względu na stanowisko w określonej kwestii należy do więcej niż jednej grupy. Sposób uzgadniania opinii w połączeniu ze sposobem ich reprezentowania determinuje wielkość możliwych grup oraz ich trwałość.

Techniki oparte na automatach komórkowych [5, 6, 17] pozwalają na badanie rozprzestrzeniania się opinii. Dzięki nim możliwe jest tworzenie wirtualnych społeczeństw, które mogą być wykorzystane do weryfikacji różnych hipotez oraz badania różnorodnych scenariuszy. Zbudowanie modelu wymaga doprecyzowania poszczególnych jego elementów: możliwych stanów, w jakich mogą znaleźć

się agencji, topologii oddziaływań (struktury połączeń), reguł przejść między stanami i sposobu uaktualniania układu. Zwykle agenci umieszczeni są w pewnym środowisku, które może być regularną siatką lub siecią złożoną [8]. Połączenia między węzłami, na których znajdują się agenci, określają, kto może z kim oddziaływać. Dla regularnej siatki odległość między jednostkami ma przełożenie na odległość geograficzną: niewielka odległość oznacza geograficzną bliskość. W przypadku sieci złożonych, ze względu na bezpośrednie połączenia dalekiego zasięgu, interpretacja geograficzna traci sens. W przypadku badanych modeli podstawową topologią będzie regularna siatka. Dzięki temu powstałe grupy społeczne będą reprezentowane przez agentów będących ze sobą w bezpośrednim kontakcie, a grupy społeczne będą tworzyły połączone klastry.

Zakładamy, że grupy społeczne oznaczają agentów posiadających te same opinie – zgodność opinii będzie interpretowana jako przynależność do tej samej grupy. W przedstawionych modelach możliwe stany będą określone przez zmienne dyskretne lub wektorowe (o dyskretnych składowych). Dzięki temu łatwo można określić, które osobniki należą do tej samej grupy. Dla skalarnej zmiennej dyskretnej zgodność opinii oznacza taką samą wartość zmiennej reprezentującej opinię. W przypadku opinii wektorowej o dyskretnych składowych, agenci są w takim samym stanie, gdy wszystkie składowe wektora reprezentującego ich opinie są takie same. Wraz ze zwiększającą się liczbą takich samych składowych wzrasta podobieństwo między osobnikami.

Na przykładzie dwóch wybranych modeli socjofizycznych: modelu Axelroda [18, 19] oraz modelu rozprzestrzeniania się kultur [20] zostanie pokazane, jak wielkość i trwałość grup społecznych zależy od sposobu uzgadniania opinii [19] oraz kierunkowości przepływu informacji i jej wartościowania [20].

Sposób uzgadniania opinii

Załóżmy, że każdy z osobników tworzących wirtualne społeczeństwo jest scharakteryzowany wektorową opinią, która ma F składowych (cech, zagadnień), a każda ze składowych przyjmuje q dyskretnych wartości (elementarnych opinii). Każda ze składowych wektora oznacza jakieś zagadnienie, w stosunku do którego należy określić stanowisko, a każda cecha przyjmuje jedną z q dyskretnych wartości $\sigma \in \{1, 2, \dots, q\}$. Dla ustalonych F i q istnieje q^F możliwych stanów, w jakich mogą znaleźć się agenci. Jeśli przyjmiemy, że kultura jest zbiorem wierzeń i praktyk, które można przyjąć lub przekazać innym, możemy próbować ją opisać i modelować. Co więcej, tak rozumiana kultura może być reprezentowana jako zbiór zagadnień, w stosunku do których należy zająć jakieś stanowisko. Dzięki temu można próbować opisać (przybliżyć) ją przy pomocy wektorowej opinii. Takie podejście zostało zastosowane przez Roberta Axelroda do opisanie rozprzestrzeniania się kultur [18]. Zaproponowany przez niego model zakłada, że agenci mogą lokalnie przyjmować (adaptować) stanowiska swoich sąsiadów, przez co się do nich upodabniają. Agenci podejmują swoje decyzje niezależnie – nikt nie wywiera scentralizowanego/sformalizowanego wpływu na nich. Wy-

miana opinii – uzgadnianie stanowisk – następuje tylko pomiędzy najbliższymi sąsiadami. Odbiorca A oddziałuje z jednym ze swoich losowo wybranych sąsiadów B (źródło informacji) z prawdopodobieństwem zależnym od podobieństwa między nimi

$$P^{AB} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^F \delta_{\sigma_i^A \sigma_i^B}. \quad (1)$$

Konkretniej, osobnik A spośród wszystkich swoich sąsiadów wybiera jednego, nazwijmy go B , a następnie oddziałuje z nim z prawdopodobieństwem P^{AB} . W powyższym równaniu, σ_i^A, σ_i^B są wartościami cechy i dla agentów A i B , a $\delta_{\sigma_i^A \sigma_i^B}$ jest deltą Kroneckera

$$\delta_{\sigma_i^A \sigma_i^B} = \begin{cases} 1 & \text{dla } \sigma_i^A = \sigma_i^B \\ 0 & \text{dla } \sigma_i^A \neq \sigma_i^B \end{cases}. \quad (2)$$

Suma w równaniu, z którego obliczono prawdopodobieństwo oddziaływania P^{AB} , zlicza liczbę kwestii, w których sąsiedzi A i B mają takie same opinie. Wraz ze wzrastającą liczbą wspólnych cech wzrasta podobieństwo między sąsiadami, które przekłada się na rosnące prawdopodobieństwo oddziaływania między nimi. Jeśli sąsiedzi A i B nie mają żadnych wspólnych cech, to $P^{AB} = 0$ i uzgadnianie poglądów między nimi nie jest możliwe, zaś dla dokładnie takich samych osobników $P^{AB} = 1$. Na skutek wymiany opinii zwiększa się podobieństwo między oddziałującymi osobnikami, ponieważ podczas każdego oddziaływania odbiorca A , w losowo wybranej kwestii, w której różni się z B , dopasowuje swoją opinię do jego stanowiska. Przykładowo, jeśli $\sigma_i^A \neq \sigma_i^B$, to po oddziaływaniu $\sigma_i^A = \sigma_i^B$. Oznacza to, że prawdopodobieństwo dalszego uzgadniania poglądów między nimi wzrasta o $1/F$. Uzgodnienie stanowisk między dwoma osobnikami A i B może nastąpić tylko wtedy, gdy istnieje co najmniej jedna kwestia, w której mają oni dokładnie taką samą opinię. Jeśli A i B nie zmieniają opinii ze względu na oddziaływanie z innymi sąsiadami, pełne uzgodnienie wszystkich stanowisk wymaga co najwyżej $F - 1$ kolejnych interakcji między nimi. W obserwowanych sytuacjach tych oddziaływań zwykle potrzeba więcej, ponieważ kolejne oddziaływania nie muszą zachodzić pomiędzy tymi samymi sąsiadami, przez co mogą one prowadzić do zmniejszania podobieństwa między A i B . Uzależnienie prawdopodobieństwa oddziaływania od podobieństwa między osobnikami sprawia, że jednostki podobne kontaktują się częściej. Osobniki nieposiadające żadnych wspólnych cech tworzą trwałe, nieprzenikalne granice między obszarami scharakteryzowanymi różnymi ideami (domenami kulturowymi). Dlatego z jednej strony w modelu Axelroda obserwujemy lokalne uzgadnianie opinii, a z drugiej strony – różnicowanie się osobników. Dzieje się tak dlatego, że upodabnianie się do sąsiada B może zwiększać liczbę różnic z sąsiadem C . Dzięki temu w stanie końcowym powstałe domeny kulturowe oddzielone są nieprzenikalnymi granicami. Wzrastająca liczba możliwych elementarnych opinii q prowadzi do większej fragmentacji, ponieważ trudniej jest znaleźć kwestię, w której sąsiedzi są zgodni. W przeciwieństwie do zwiększania q , wzrost liczby zagadnień F zmniejsza liczbę

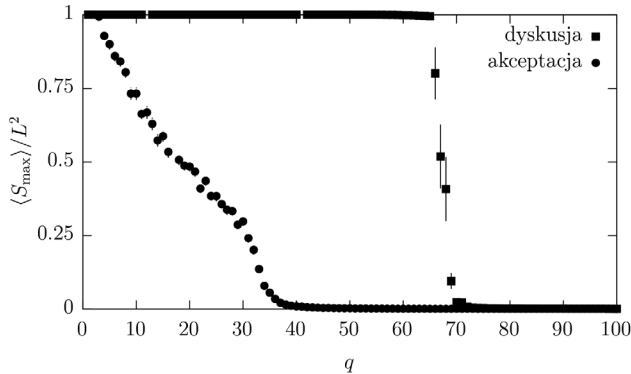
bę domen kulturowych w stanie końcowym, ponieważ większa liczba kwestii, w których należy przyjąć jakieś stanowisko, zwiększa szansę na znalezienie choć jednej zgodnej opinii, w oparciu o którą można uzgadniać stanowiska w pozostałych kwestiach.

Podstawowa wersja modelu Axelroda zakłada, że agenci umieszczeni są w węzłach regularnej siatki kwadratowej i każdy z nich ma czterech najbliższych sąsiadów. Topologia regularnej siatki kwadratowej o rozmiarze $L \times L$ i okresowych warunkach brzegowych jest także wyjściową strukturą połączeń w badaniach zmodyfikowanego modelu Axelroda. W stanie początkowym w każdym węźle siatki znajduje się jeden agent, a jego opinia jest losowa – w każdej z F kwestii przyjmuje on losowo jedno z q dopuszczalnych stanowisk. W tak przygotowanym układzie agenci zaczynają oddziaływać według reguł opisanych w poprzednim paragrafie. Dlatego spośród $L^2 = L \times L$ osobników wybieramy jednego, nazwijmy go A , a następnie spośród czterech jego najbliższych sąsiadów losujemy kolejnego, nazwijmy go B . Po wybraniu oddziałujących osobników A i B obliczamy P^{AB} i z takim to prawdopodobieństwem dochodzi do wymiany opinii między A i B . Procedura losowania oddziałujących agentów jest kontynuowana do momentu powstania klastrów kulturowych oddzielonych nieprzenikalnymi granicami. Taki stan końcowy nie ulega dalszym zmianom, ponieważ w obrębie klastrów agenci są w takim samym stanie, a w różnych klastrach są zupełnie inni.

Uzgadnianie opinii w oryginalnym modelu Axelroda jest powolne, ponieważ podczas każdej interakcji między A i B uzgadniana jest tylko jedna kwestia, dodatkowo uzgodnienie zachodzi z prawdopodobieństwem P^{AB} . Ze względu na brak pamięci, w kolejnych interakcjach agent A może wymieniać opinie z innym sąsiadem niż B , co w konsekwencji może prowadzić do zmniejszenia podobieństwa agentów A i B . Celem przyspieszenia procesu uzgadniania opinii i formowania się granic między domenami kulturowymi rozważmy dwa schematy, które prowadzą do pełnego uzgodnienia opinii w czasie jednej interakcji [19]. Jeśli podczas uzgadniania opinii agent A wylosuje sąsiada B , to z prawdopodobieństwem P^{AB} następuje pełne uzgodnienie ich opinii na zasadzie (i) zaakceptowania przez odbiorcę A całej opinii wylosowanego sąsiada B : $\sigma_i^A = \sigma_i^B$ lub (ii) dyskusji (wymiany poglądów) – z takim samym prawdopodobieństwem: $\sigma_i^A \rightarrow \sigma_i^B$ lub $\sigma_i^B \rightarrow \sigma_i^A$. Oba schematy zmieniają stanowiska agentów tylko w kwestiach $i \in \{1, \dots, F\}$, w których agenci A i B różnią się.

Stan końcowy dla modelu Axelroda składa się z domen kulturowych oddzielonych nieprzenikalnymi granicami. Stopień fragmentacji stanu końcowego najlepiej scharakteryzować poprzez parametr porządku. Parametr porządku jest to wielkość, która jest równa 1, gdy w układzie panuje doskonały porządek (wszyscy agenci posiadają taką samą opinię – brak fragmentacji), natomiast w przypadku zupełnego nieporządku (każdy agent posiada inną opinię – pełna fragmentacja) jest równy 0. Przykładowo parametrem porządku może być rozmiar maksymalnego klastra (wielkość największej grupy osobników posiadających taką samą opinię) S_{\max} podzielony przez całkowitą liczbę agentów $L^2 = L \times L$.

Model Axelroda oraz jego zmodyfikowana wersja są modelami stochastycznymi, dlatego dla każdej realizacji modelu wartość parametru porządku będzie inna. Losowe zachowanie modelu jest konsekwencją probabilistycznych reguł oddziaływania oraz losowych stanów początkowych. Dlatego analiza własności stanu końcowego opiera się na badaniu średniego rozmiaru maksymalnego klastra $\langle S_{\max} \rangle / L^2$.



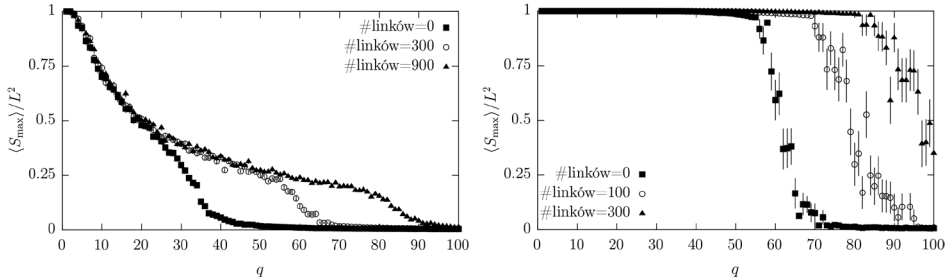
Rys. 1. Zależność parametru porządku, średniego rozmiaru maksymalnego klastra $\langle S_{\max} \rangle / L^2$, dla obu scenariuszy uzgadniania opinii [19] w funkcji maksymalnej liczby opinii q . Różne krzywe odpowiadają różnym sposobom lokalnego uzgadniania opinii: dyskusja „■” i akceptacja „●”.

Układ składa się z $L \times L = 200 \times 200$ agentów, a liczba cech $F = 10$

Rys. 1 pokazuje zależność parametru porządku od liczby wartości q , jaką może przyjmować każda z F cech ($F = 10$). Dla niewielkich wartości q został osiągnięty globalny konsensus i wszyscy lub prawie wszyscy agenci należą do dominującego klastra. Wraz ze wzrastającą liczbą wartości, jaką może przyjmować każda cecha, wartość parametru porządku zmniejsza się. Scenariusz zanikania porządku zależy jednak od sposobu uzgadniania opinii. W przypadku (i) akceptacja – obserwujemy stopniowy zanik uporządkowania prowadzący do stanów o większej fragmentacji. Natomiast w przypadku (ii) dyskusja – stan końcowy w szerokim zakresie zmienności q jest doskonale uporządkowany. Niemniej jednak dla dostatecznie dużego q także i on jest zatomizowany. Przejście między stanem uporządkowanym a nieuporządkowanym przypomina nieciągłe przejście fazowe. Dla odpowiednio dużych q stany końcowe są silnie sfragmentowane, a parametr porządku $\langle S_{\max} \rangle / L^2 \approx 0$. W sytuacji, w której podczas każdego oddziaływania opinie oddziałujących agentów uzgadniają się w pełni, prawdopodobieństwo P^{AB} określa tempo dochodzenia do stanu końcowego, ponieważ z prawdopodobieństwem $1 - P^{AB}$ nie następuje uzgodnienie opinii.

Wyniki przedstawione na rys. 1 odpowiadają sytuacji, gdy agenci umieszczeni są w węzłach regularnej siatki kwadratowej $L \times L$ z periodycznymi warunkami brzegowymi. Każdy osobnik ma dokładnie czterech sąsiadów, z którymi może uzgadniać poglądy. W rzeczywistych sieciach społecznych wymiana informacji zachodzi nie tylko między najbliższymi sąsiadami, ale także osobnikami znaj-

dującymi się w znacznej odległości geograficznej. Dzieje się tak ze względu na obecność nielokalnych połączeń. Po dodaniu nielokalnych połączeń regularna siatka kwadratowa zamienia się w dwuwymiarowy mały świat [8, 21]. Dla sieci typu małego świata odległość mierzona liczbą linków oddzielających jest o wiele mniejsza niż dla regularnej siatki. W takiej sieci oprócz oddziaływania z najbliższymi sąsiadami zachodzą oddziaływania nielocalne poprzez dodatkowe linki (skrótły).



Rys. 2. Zależność parametru porządku, średniego rozmiaru maksymalnego klastra $\langle S_{\max} \rangle / L^2$, dla obu scenariuszy lokalnego uzgadniania opinii: akceptacja (z lewej) oraz dyskusja (z prawej) w funkcji maksymalnej liczby opinii q . Różne krzywe odpowiadają różnej liczbie nielokalnych połączeń dalekiego zasięgu. Układ składa się z $L \times L = 50 \times 50$ agentów, a liczba cech $F = 10$

Zamiana regularnej siatki na dwuwymiarowy mały świat zmienia własności zmodyfikowanego modelu Axelroda. Kolejny rysunek (rys. 2) przedstawia średni rozmiar maksymalnego klastra dla obu przedstawionych sposobów uzgadniania opinii. Lewa kolumna pokazuje wyniki dla pierwszego scenariusza – akceptacja, zaś w prawej kolumnie znajdują się wyniki dla drugiego scenariusza uzgadniania opinii – dyskusja. Poszczególne krzywe pokazują wartości parametru porządku $\langle S_{\max} \rangle / L^2$ dla różnej liczby nielokalnych połączeń (linków). Wraz ze wzrastającą liczbą połączeń krytyczna liczba elementarnych opinii q , dla której następuje zupełna fragmentacja układu, wzrasta. Nie zmienia się natomiast charakter przejścia między stanem uporządkowanym a nieuporządkowanym. Powyższe zachowanie spowodowane jest tym, że wzrastająca liczba połączeń zmniejsza liczbę opinii występujących w stanie końcowym. Dla modelu Axelroda można także pokazać, że średni czas potrzebny na osiągnięcie stanu końcowego rośnie wraz ze spadkiem liczby opinii w stanie końcowym. Stany końcowe o większej fragmentacji są osiągnane szybciej niż lokalny lub globalny konsensus. Ustalanie opinii na zasadzie dyskusji prowadzi do powstania większych grup niż w przypadku akceptacji opinii, ale wymaga jednocześnie nieznacznie dłuższego czasu.

Wartościowanie informacji

W modelu Axelroda agent oddziałuje z jednym ze swoich losowo wybranych sąsiadów z prawdopodobieństwem P^{AB} . Nie ma w nim także pamięci, w kolejnych oddziaływaniach agent A może oddziaływać z innym sąsiadem niż poprzednio. Dodatkowo, co najważniejsze, uzyskana informacja (przyjęta elementarna

opinia) nie jest żaden sposób wartościowana. Zobaczymy, jakie znaczenie ma wartościowanie informacji, np. jej wiekiem. W tym celu rozpatrzmy model powstawania centrów kulturowych [20], w którym każdy z agentów będzie posiadał skalarną opinię opisaną dodatnią liczbą całkowitą.

Podczas uzgadniania opinii w modelu Axelroda elementarna opinia osobnika (wartość każdej z cech) jest bezwarunkowo akceptowana, a stanowisko w każdej kwestii jest tak samo ważne. Agent A dostosowując swoje stanowisko w jakiejś kwestii do stanowiska osobnika B , nie zastanawia się, czy któreś ze stanowisk jest lepsze. Na dostosowanie stanowiska można spojrzeć jak na proces akceptacji informacji (skalarna opinia) lub jej części (wektorowa opinia) posiadanej przez sąsiada. W przypadku informacji można próbować ją wartościować. Sposobów wartościowania może być wiele, tutaj założymy, że wiek informacji określa jej wartość: informacje nowsze są cenniejsze. W modelu powstawania centrów kulturowych i rozprzestrzeniania się informacji [19], podobnie jak w modelu Axelroda, zakładamy, że L^2 agentów znajduje się na regularnej siatce kwadratowej $L \times L$ z otoczeniem von Neumanna, czyli każdy osobnik ma czterech (najbliższych) sąsiadów, z którymi może oddziaływać. Dla uproszczenia zakładamy okresowe warunki brzegowe. Każdy osobnik scharakteryzowany jest przez (jedną) posiadaną informację, która jest reprezentowana przez zmienną dyskretną. Dodatkowo każdy agent zna wiek posiadanej informacji, dlatego oddziałując z jakimś z sąsiadów sprawdza nie tylko, czy posiada on inną informację, ale także weryfikuje, czy jest ona nowsza. W przypadku, gdy sąsiad posiada inną informację, która jest nowsza od posiadanej, akceptuje ją. Po każdym przyjęciu nowej informacji, agent pamięta od kogo ją uzyskał. Sąsiad, który dostarczył ostatnią informację staje się preferowanym źródłem informacji. Dlatego w kolejnych oddziaływaniach wybierany jest on z prawdopodobieństwem $1 - 3p$, podczas gdy każdy z pozostałych trzech sąsiadów może zostać wylosowany z prawdopodobieństwem p . Dla $p \in [0, 1/4)$ sąsiad, który dostarczył ostatnią informację, jest faworyzowany w porównaniu do pozostałych sąsiadów. Mechanizm wyróżniania jednego z sąsiadów wprowadza pamięć do modelu, która dla $p \rightarrow 0$ prowadzi do bardzo silnego przywiązania do jednego z sąsiadów. Pamięć ta ma kluczowe znaczenie dla własności modelu, to właśnie ona determinuje, który z sąsiadów staje się preferowanym źródłem informacji i jak łatwo zmienia się sieć, przez którą są przesyłane informacje.

Samo wartościowanie informacji oraz pamięć o ostatnim źródle informacji nie wystarcza do nieoczywistego zachowania modelu. Jeśli w układzie zostanie umieszczona jakaś informacja, to po dostatecznie długim czasie zostanie ona zaakceptowana przez wszystkie osobniki, a każdy agent będzie pamiętał, od kogo ją uzyskał. Dlatego w takim przypadku dynamika układu jest w pełni przewidywalna. Ciekawsza sytuacja wystąpi wtedy, gdy pojawi się konkurencja pomiędzy nowymi informacjami pochodzącymi z różnych źródeł. Jeśli takie informacje będą pojawiały się rzadko, to będą przyjmowane przez wszystkich agentów. Preferencja w nasłuchiowaniu sąsiada, który dostarczył ostatnią zaakceptowaną

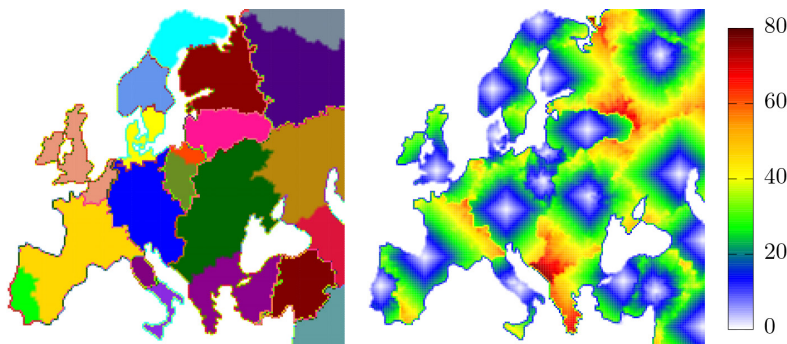
informację, może spowalniać przyjęcie nowej. Z interesującą sytuacją będziemy mieć do czynienia dopiero wtedy, gdy różne informacje będą konkurowały między sobą. Warunkiem prawdziwej konkurencji jest zdolność do ponownego wysyłania nowych informacji przez osobników, którzy w przeszłości już wysyłali informacje. Wysyłanie nowych informacji jest mechanizmem, który zabezpiecza agenta przed przyjęciem konkurencyjnej informacji, zaś takiego agenta możemy nazwać źródłem informacji lub określić go jako centrum kulturowe.

Minimalny model rozprzestrzeniania się informacji i powstawania centrów kulturowych, prowadzący do nietrywialnej dynamiki, jest zdefiniowany przez trzy prawdopodobieństwa: p , p_{new} oraz p_{rep} . Tak jak poprzednio, p jest miarą asymetrii w wyborze sąsiadów, z którymi dochodzi do interakcji. W każdym kroku symulacji podejmowana jest próba utworzenia jednego nowego centrum kulturowego w losowo wybranym węźle siatki z prawdopodobieństwem p_{new} , wysłania nowych sygnałów przez każde z istniejących źródeł informacji z prawdopodobieństwem p_{rep} oraz próby uaktualnienia informacji posiadanej przez każdego z L^2 agentów. Próba utworzenia nowego centrum kulturowego jest podejmowana przez jednego, losowo wybranego agenta jednokrotnie na każdy krok symulacji z niewielkim prawdopodobieństwem p_{new} . Dodatkowo, każde istniejące centrum kulturowe próbuje uaktualnić, z prawdopodobieństwem p_{rep} , wysłaną przez siebie informację poprzez zresetowanie jej wieku. Uaktualnianie informacji jest kluczowe dla trwałości istniejących centrów kulturowych, ponieważ źródło informacji jest aktywne tak długo, jak tworzący je agent nie zaakceptuje nowej informacji, różnej od dotychczas przez niego posiadanej. Ostatnim elementem pojedynczego kroku symulacji jest uaktualnienie stanu każdego z L^2 osobników. Uaktualniana jednostka poszukuje lokalnie nowszej informacji poprzez sprawdzanie, jakie informacje posiadają najbliżsi sąsiedzi. Prawdopodobieństwo p określa asymetrię w ich nasłuchiowaniu. Agent, który dostarczył ostatnią informację jest wybierany z prawdopodobieństwem $1 - 3p$, a każdy z trzech pozostałych sąsiadów z prawdopodobieństwem p ($0 \leq p < 1/4$). Podczas takiego oddziaływania agent może zaakceptować inną nowszą informację niż posiadana lub zaktualizować wiek już posiadanej informacji, gdyby pojawiła się jej odświeżona wersja. Wiek informacji jest mierzony liczbą kroków symulacji od czasu wysłania informacji lub momentu jej aktualizacji (zresetowania). W przypadku zaakceptowania nowej informacji, faworyzowanym sąsiadem staje się ten, który ją dostarczył. Dlatego, w granicy $p \rightarrow 0$, zmiany faworyzowanych sąsiadów zachodzą coraz rzadziej, przez co sieć, przez którą następuje przepływ informacji, staje się bardziej statyczna.

W ramach trójparametrowego modelu powstawania centrów kulturowych i rozprzestrzeniania się informacji możliwe jest (i) określenie mechanizmów gwarantujących trwałość centrów kulturowych i ich odporność na ataki oraz (ii) wyznaczenie optymalnych miejsc na umieszczenie nowych źródeł informacji.

Osobnik stanowiący centrum kulturowe, podobnie jak każdy inny z agentów tworzących układ, może zaakceptować nowszą informację. Dla „normal-

nego” agenta niebędącego centrum kulturowym może to oznaczać znalezienie się w strefie wpływów innego źródła informacji, natomiast jeśli agent będący centrum kulturowym przyjmie nową informację, to przestaje pełnić tę funkcję. Ponieważ nowsza informacja uważana jest za bardziej wartościową, o trwałości istniejących centrów kulturowych decyduje częstotliwość wysyłania nowych sygnałów (p_{rep}) oraz łatwość, z jaką może zmieniać się sieć preferowanych kierunków (p). Wysyłanie nowych informacji jest kluczowe, aby w okolicach centrum kulturowego nie pojawiła się nowsza, konkurencyjna informacja. Samo wysyłanie nowych sygnałów nie zabezpiecza centrum kulturowego w pełni oraz nie sprawia, że grupa osób czerpiących z tego centrum informacji będzie duża. Dla rozmiaru domen kulturowych i ich trwałości znaczenie ma także, jak łatwo agenci zmieniają swoje preferowane źródła informacji. Statyczna sieć preferencji $p \rightarrow 0$ połączona z częstym wysyłaniem nowych sygnałów, pozwala na tworzenie trwałych grup agentów posiadających tę samą informację.

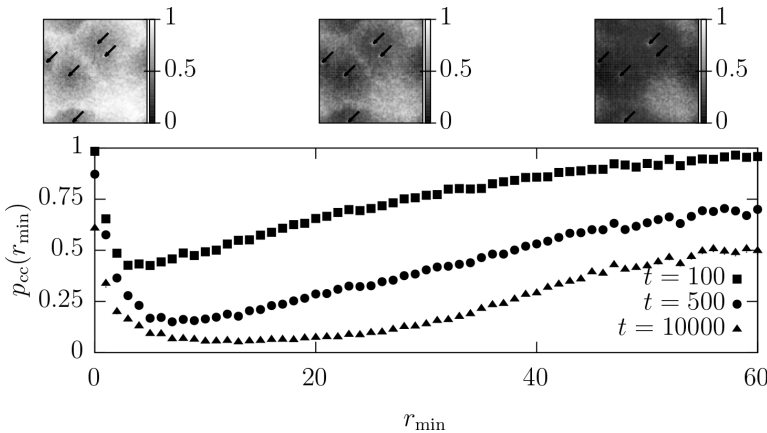


Rys. 3. Przykładowe domeny kulturowe tworzące się w modelu powstawania i rozwoju centrów kulturowych [20]. Rysunek z lewej pokazuje różne domeny kulturowe, a z prawej odległości od odpowiednich źródeł informacji (centrów kulturowych). Domeny kulturowe (rysunek z lewej) oznaczone są różnymi kolorami, a odpowiadające im centra kulturowe znajdują się środkach białych ognisk (rysunek z prawej). Parametry symulacji: $p = 0,01$, $p_{\text{new}} = 2^{-10}$ oraz $p_{\text{rep}} = 2^{-2}$

Omawiany model prowadzi do podziału całego układu na strefy wpływów poszczególnych centrów kulturowych. Obszarem, w którym następuje najsilniejsza konkurencja między różnymi centrami kulturowymi, są granice między kłastami. To osobnicy będący na granicy, mogą najłatwiej zmienić posiadaną informację. Trwałość granic określona jest poprzez parametr p . Im mniejsze p , tym granice stają się bardziej statyczne. Znaczenie ma także odległość od centrum kulturowego. Bliższe centrum szybciej dostarcza nowe informacje, ponieważ szlak komunikacyjny: źródło informacji – granica między domenami kulturowymi jest krótszy. W ogólności o trwałości domen kulturowych mogą decydować naturalne przeszkody, utrudniające dostęp do niektórych węzłów siatki. Na przykładzie uproszczonej mapy Europy, numeryczne badanie modelu powstawania centrów kulturowych pokazuje, że trwałe centra mogą istnieć na wyspach i półwyspach [20]. Wyspy i półwyspy jako miejsca izolowane mają krótsze granice z innymi

domenami kulturowymi. Dodatkowo, rozprzestrzenianie się informacji zachodzi na zasadzie dyfuzji, stąd informacjom z zewnątrz trudniej jest je osiągnąć. Rys. 3 pokazuje przykładowe domeny kulturowe na mapie Europy (z lewej) wraz z odległościami do odpowiednich centrów kulturowych (z prawej) [20]. Mapa Europy została umieszczona na siatce 200×200 , a odległość między agentami mierzona jest rzędem sąsiedztwa.

Pamięć o poprzednich oddziaływaniach, podczas których została uaktualniona posiadana informacja, buduje korytarze komunikacyjne, którymi efektywnie może być przekazywana informacja z centrów kulturowych. Dla małych p ścieżki te podlegają niewielkim fluktuacjom i działają bardzo sprawnie. Każde nowe źródło informacji zostaje umiejscowione na jakimś istniejącym już szlaku komunikacyjnym. Dolna jego część zostaje wykorzystana do rozsyłania nowych sygnałów, podczas gdy górna część prowadzi do uprzednio istniejącego centrum kulturowego. Dlatego istnieje realne zagrożenie, że dzięki górnej części ścieżki komunikacyjnej w okolicach nowego centrum kulturowego pojawi się konkurencyjna informacja, która będzie zagrożeniem dla właśnie założonego centrum kulturowego.



Rys. 4. Prawdopodobieństwo przeżycia nowo dodanego źródła informacji [20] – prawdopodobieństwo, że źródło informacji umieszczone w określonym punkcie (x, y) w chwili $t = 0$ będzie nadal występować w układzie w chwili t . Mapy w górnym panelu pokazują prawdopodobieństwa istnienia nowo dodanego źródła informacji jako funkcję położenia (x, y) dla $t \in \{100, 500, 10\,000\}$. Dolny wykres pokazuje prawdopodobieństwo przeżycia $p_{cc}(r_{\min})$ jako funkcję odległości r_{\min} od najbliższego źródła informacji. Układ składa się z 100×100 agentów. Pozostałe parametry: $p = 0,01$, $p_{\text{new}} = 2^{-10}$ oraz $p_{\text{rep}} = 2^{-2}$

W celu dokładnego zbadania, które miejsca pozwalają na założenie najtrwałszych centrów kulturowych, określono, jakie miejsca w układzie są najlepsze na umieszczenie nowych, trwałych źródeł informacji. W tym celu na regularnej siatce kwadratowej 100×100 przygotowano konfigurację początkową z ukształtowaną siecią preferencji oraz pięcioma centrami kulturowymi, położenie których wskazują strzałki w górnym panelu rysunku 4. Dla tak przygotowanego stanu początkowego, dla każdego z $L^2 - 5 = 10^4 - 5$ węzłów poprzez kilkudziesięcio-

krotne uśrednienie, wyznaczono prawdopodobieństwo przeżycia źródła informacji umieszczonego w tym punkcie. Górny panel rys. 4 przedstawia dwuwymiarowe mapy demonstrujące, jakie jest prawdopodobieństwo, że źródło informacji umieszczone w węzle (x, y) istnieje nadal w czasie $t \in \{100, 500, 10\,000\}$. Natomiast dolny wykres pokazuje, jakie jest prawdopodobieństwo przeżycia centrum kulturowego p_{cc} w tych samych chwilach czasu w funkcji odległości r_{\min} do najbliższego istniejącego źródła informacji. Analiza ta wskazuje, że miejscami, które dają największe szanse na założenie trwałego centrum kulturowego, są punkty w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących źródeł informacji lub miejsca możliwie najbardziej odległe od istniejących centrów. Pierwszy scenariusz pozwala na przejście znacznej części istniejącej struktury komunikacyjnej, podczas gdy drugi pozwala na znalezienie niszy i zbudowanie własnej sieci połączeń.

Podsumowanie

Symulacje komputerowe, w szczególności te wykorzystujące techniki automatów komórkowych, pozwalają na badanie wirtualnych społeczeństw. Eksperymenty *in silico* pozwalają na weryfikację różnorodnych hipotez oraz określenie znaczenia przyjętych założeń i uproszczeń. Dzięki nim możliwa jest identyfikacja oraz modyfikacja czynników określających zachowania badanych układów. Wszystko to sprawia, że automaty komórkowe i modelowanie agentowe trwale zagościły między innymi w socjofizyce, obliczeniowych naukach społecznych i modelowaniu epidemiologicznym.

Na przykładzie dwóch wybranych modeli socjoficznych pokazano, jak złożoność opinii i sposób ich uzgadniania wpływa na rozmiar i trwałość grup scharakteryzowanych tą samą opinią. Pokazano także, jakie znaczenie dla wielkości domen kulturowych ma kierunkowość przepływu informacji i jej ocena. Pomimo tego, że przedstawione modele opierają się na szeregu uproszczeń, pozwalają one na wyciągnięcie wielu wniosków, które można skonfrontować z realnymi sytuacjami. W przypadku złożonych (wektorowych) opinii, większe grupy społeczne powstają, gdy wspólne stanowisko ustalane jest na zasadzie konsensusu, a nie jest narzucone lub bezwiednie akceptowane [19]. Dzięki mechanizmowi konsensusu powstałe grupy są trwalsze, niemniej jednak ich rozpad jest możliwy. Jeśli mamy do czynienia z rozpadem grup powstałych w wyniku szerokiej dyskusji, ich rozpad jest bardzo gwałtowny i następuje powyżej krytycznej liczby możliwych stanowisk w kwestiach tworzących opinie. Trwałe struktury społeczne mogą powstać także w układach, w których następuje ciągły przepływ (dopływ) informacji połączony z silnym przywiązaniem (uzależnieniem) od wybranych źródeł informacji [20]. W takich układach trwałość grup społecznych może zostać wzmocniona dzięki przeszkodom o charakterze geograficznym. Dlatego grupy istniejące na wyspach czy izolowanych półwyspach są trwalsze. Uwzględnienie dodatkowych oddziaływań dalekiego zasięgu pozwala na powstanie większych grup społecznych, które ze względu na osłabienie pozycji istniejących centrów kulturowych stają się mniej trwałe.

Analizując model rozprzestrzeniania się informacji i powstawania centrów kulturowych [20], można zidentyfikować wiele zjawisk spotykanych w rzeczywistych układach. Utrzymanie dużych domen kulturowych wymaga nieustannego wysyłania nowych informacji (szum informacyjny). Ze względu na rosnącą długość ścieżek komunikacyjnych przesyłanie informacji staje się trudniejsze – to właśnie zwykle granice między obszarami są najbardziej oddalone od centrów kulturowych. Proces przesuwania się granic między domenami kulturowymi zachodzi na zasadzie dyfuzji, zaś faworyzowanie jednego z sąsiadów w granicy $p \rightarrow 0$ prowadzi do powstawania baniek informacyjnych.

Badane modele, pomimo swojej koncepcyjnej prostoty, pozwalają na obserwację, klasyfikację i kwantyzację wielu interesujących efektów. W badanych modelach struktura połączeń między osobnikami określa, kto z kim oddziałuje. W realnych sytuacjach struktura połączeń nie jest statyczna, ale ewoluuje wraz ze zmianami zachodzącymi w układzie. Wyraźnie widać to w czasie epidemii Covid19, kiedy to sieci kontaktów uległy znaczącym zmianom. Dlatego w ogólności dynamika modeli społecznych czy epidemiologicznych powinna być powiązana z dynamiką struktury połączeń między osobnikami. Dla właściwego określenia związku między dynamiką modelu a dynamiką sieci kontaktów konieczna jest identyfikacja skal czasowych, które określają tempo zachodzących procesów. Badanie dynamicznych sieci społecznych wydaje się szczególnie interesującym zagadnieniem.

Wybrana literatura

- [1] C. Castellano, S. Fortunato, and V. Loreto, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 591 (2009).
- [2] A. Jędrzejewski and K. Sznajd-Weron, *C. R. Physique* **20**, 244 (2019).
- [3] W. Bartkowski and D. Batorski, *Studia Socjologiczne* **1**, 113 (2003).
- [4] W. Weidlich, *Sociodynamics: A systematic approach to mathematical modelling in the social sciences* (Harwood Academic, Reading, 2000).
- [5] S. Wolfram, *A new kind of science* (Wolfram Media, Champaign, IL, 2002).
- [6] K. Kułakowski, *Automaty komórkowe* (Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica. Ośrodek Edukacji Niestacjonarnej, Kraków, 2000).
- [7] M. E. J. Newman and G. T. Barkema, *Monte Carlo methods in statistical physics* (Clarendon Press, Oxford, 1999).
- [8] R. Albert and A. L. Barabasi, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 47 (2002).
- [9] H. W. Hethcote, *SIAM Rev.* **42**, 599 (2000).
- [10] R. A. Holley and T. M. Liggett, *Ann. Probab.* **3**, 643 (1975).
- [11] M. Lewenstein, A. Nowak, and B. Latané, *Phys. Rev. A* **45**, 763 (1992).
- [12] S. Galam, *Eur. Phys. J. B* **25**, 403 (2002).
- [13] K. Sznajd-Weron and J. Sznajd, *Int. J. Mod. Phys. C* **11**, 1157 (2000).
- [14] G. Deffuant, D. Neau, F. Amblard, and G. Weisbuch, *Adv. Complex Syst.* **3**, 87 (2000).
- [15] R. Hegselmann and U. Krause, *J. Artif. Soc. Soc. Simulat.* **5**, 2 (2002).
- [16] B. M. McCoy and T. T. Wu, *The two-dimensional Ising model* (Dover Publications, Mineola, 2014).
- [17] S. Wolfram, *Rev. Mod. Phys.* **55**, 601 (1983).
- [18] R. Axelrod, *J. Confl. Resolut.* **41**, 203 (1997).
- [19] B. Dybiec, N. Mitarai, and K. Sneppen, *Eur. Phys. J. B* **85**, 357 (2012).
- [20] B. Dybiec, N. Mitarai, and K. Sneppen, *Phys. Rev. E* **85**, 056116 (2012).
- [21] D. J. Watts and S. H. Strogatz, *Nature (London)* **393**, 440 (1998).