

Maciej KARCZEWSKI

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu  
ORCID: 0000-0002-5085-3920

## Symulacje komputerowe modeli wieloagentowych (ABM) jako narzędzie badawcze w naukach społecznych

**Streszczenie:** Artykuł stanowi podsumowanie badań prowadzonych przez autora w zakresie praktycznego wykorzystania technik symulacji komputerowych w odniesieniu do problematyki nauk społecznych, ze szczególnym uwzględnieniem politologii oraz socjologii. Głównym przedmiotem badań były wieloagentowe modele symulacyjne (ABM – *Agent-Based Models*), które znalazły jak dotąd najszerze zastosowanie na gruncie nauk społecznych. Przytoczone przykłady modeli wieloagentowych (model segregacji przestrzennej Schellinga oraz model ewolucji postaw etnocentrycznych Axelroda-Hammonda) oparte zostały na autorskich implementacjach napisanych w języku Python 3.6. Wykorzystano to narzędzie, w celu bezpośredniej weryfikacji ustaleń poczynionych przez cytowanych autorów, a także dokładnego przedstawienia zastosowanej przez nich metodologii. Ujęta w pracy dyskusja obejmuje kwestie związane z prawdziwością modeli symulacyjnych, a co za tym idzie zasadnością ich użycia w celach naukowych.

**Słowa kluczowe:** model, symulacja, Axelrod, Schelling, ABM, metodologia

---

Zaawansowane techniki symulacji komputerowych stanowią niezwykle ważne narzędzie badawcze na gruncie wielu specjalistycznych dziedzin i dyscyplin współczesnej nauki. Wykorzystywane są głównie przez przedstawicieli nauk przyrodniczych, dla których stały się niezastąpionym elementem ich warsztatu naukowego. Zestawienie złożonych problemów badawczych z rosnącymi możliwościami technologii informacyjnych pozwoliło znacząco przyspieszyć rozwój współczesnej nauki. Techniki te nie muszą być jedynie domeną wysoko wyspecjalizowanych dziedzin w ramach nauk przyrodniczych. Coraz częściej, po wsparcie maszyn obliczeniowych sięgają przedstawiciele nauk społecznych, w tym socjologowie czy ekonomiści. Niniejszy artykuł stanowi próbę bardziej szczegółowego ujęcia tego zagadnienia oraz przedstawienia praktycznych zastosowań naukowych.

Przedstawione w artykule przykłady zastosowania symulacji komputerowych zostały w całości oparte na zagadnieniu modeli wieloagentowych (ABM – *Agent-Based Models*), które bazują na teorii automatów, stanowiącej jedną z kluczowych dziedzin współczesnej informatyki. Symulacje oparte na koncepcji ABM znajdują obecnie niezwykle wąskie zastosowanie w odniesieniu do wybranych problemów formułowanych na gruncie szeroko rozumianych nauk społecznych. Stanowią jednocześnie doskonały przykład praktycznego wykorzystania metod symulacyjnych.

### Od automatów komórkowych do symulacji modeli wieloagentowych (ABM)

Symulacja (łac. *simulatio* – udawanie) w swoim podstawowym znaczeniu oznacza proces przybliżonego odwzorowywania zjawisk, procesów czy zachowań w oparciu o przy-

jęty model rzeczywistości. Symulacja komputerowa zjawisk świata naturalnego niemal zawsze oparta jest na wysoce abstrakcyjnym modelu matematycznym zapisanym w treści programu komputerowego, którego rdzeniem jest algorytm zasilany zmiennymi ujętymi w formie określonych struktur danych. Pamiętajmy, że model symulacyjny jedynie „udaje” rzeczywistość w oparciu o przyjęte warstwy abstrakcji reprezentujące wybrane aspekty funkcjonowania badanego zjawiska (Gilbert, Troitzsch, 2005, s. 15–27). Nie stanowi więc wiernej kopii rzeczywistego systemu i nie może być traktowany jako jego substytut. Powyższa klauzula narzuca nam szereg ograniczeń przy doborze problemów badawczych oraz konstruowaniu modeli symulacyjnych. Kluczowym czynnikiem warunkującym powodzenie badań opartych na symulacjach komputerowych jest więc odpowiedni dobór metodologii, która najlepiej wpisująłaby się w specyfikę nauk społecznych.

Jedną z najczęściej stosowanych w naukach społecznych klas komputerowych modeli symulacyjnych są modele oparte na systemach wieloagentowych (*Multi-Agent Systems*). Zaimplementowany w ich ramach algorytm oparty jest na interakcjach zachodzących w ramach grupy autonomicznych elementów (agentów symulacyjnych), których zachowania w mikroskali kształtują zachowania systemu jako całości (Miller, Page, 2007, s. 78–88). Korzenie tego pomysłu sięgają teorii automatów, rozwijanej na gruncie współczesnej informatyki.

Koncepcja automatów komórkowych została opracowana na początku drugiej połowy XX w. przez fizyka John von Neumanna. We współpracy z matematykiem Stanisławem Ulamem zaproponował stworzenie dyskretnej dwuwymiarowej przestrzeni złożonej z sąsiadujących ze sobą komórek przybierających skończoną liczbę stanów. Stan każdej z komórek umiejscowionych na siatce obliczany był w oparciu o parametry wyciągane na podstawie stanów komórek znajdujących się w bezpośrednim otoczeniu. Był to wysoce abstrakcyjny twór mający imitować (symulować) działanie systemu, złożonego z pełni autonomicznych jednostek obliczeniowych (Neumann, 1963; Benenson, Torrens, 2004, s. 93–96). Pomysł doczekał się pierwszej praktycznej implementacji w 1970 r., w ramach stworzonej przez matematyka Johna Conwaya *Gry w życie* (*Game of Life*). Stworzony przez niego algorytm przyciągnął uwagę badaczy chcących wykorzystać możliwości automatów przy tworzeniu symulatorów złożonych procesów fizycznych (Wainwright, 2010, s. 11–16).

Strukturę automatu komórkowego opisać można za pomocą czterech podstawowych parametrów (Hoekstra, Kroc, Sloot, 2010, s. 6–8):

- a) dyskretna  $n$ -wymiarowa macierz złożona z przylegających do siebie homogenicznych węzłów (komórek), najczęściej reprezentowanych w toku wizualizacji przez prostokąty (teselacja);
- b) dyskretne stany: po każdej iteracji symulującej upływ czasu każdy z automatów przyjmuje wyłącznie jeden stan należący do określonego zbioru;
- c) lokalność interakcji: zachowanie każdej pojedynczej komórki zdeterminowane jest stanem komórek pozostających w najbliższym sąsiedztwie (włączając lub wyłączając komórkę centralną);
- d) dyskretna dynamika: stany komórek uaktualniane są synchronicznie w dyskretnych momentach  $(t + 1)$  w oparciu o deterministyczną funkcję stanu sąsiadów w chwili  $t$ . Dla jednowymiarowej przestrzeni siatki formalna reguła określająca stan pojedynczej komórki może przybrać więc formalną postać:

$$\sigma_i(t+1) = \varphi(\sigma_{(i-r)}(t), \sigma_{(i-r+1)}(t), \dots, \sigma_{(i+r-1)}(t), \sigma_{(i+r)}(t))$$

Definiując system automatu dwuwymiarowego najlepiej jednak posłużyć się popularnym formalizmem sformułowanym przez Edwarda Fredkina (Chopard, 1995, s. 113–115), w którym symulacja odbywa się w przestrzeni kwadratowej siatki o rozmiarze  $N \times N$ . Pozycję każdej komórki określamy za pomocą wektora pozycji  $r = (i, j)$ , gdzie wartości  $i$  oraz  $j$  stanowią indeksy kolumn i wierszy siatki. Stan każdej z komórek definiowany więc jest jako  $\varphi_t(\vec{r}, t)$ . Przybierać może wartości binarne  $S = \{0, 1\}$ , oznaczające, że w danej chwili komórka jest „włączona” lub „wyłączona”. Początkowe ustawienia automatu ustalane są poprzez pseudolosowe przypisanie każdej z komórek zmiennej odpowiadającej jednemu ze wszystkich przewidzianych przez system stanów:

$$\varphi(\vec{r}, t) = \{\varphi_1(\vec{r}, t), \varphi_2(\vec{r}, t), \dots, \varphi_m(\vec{r}, t)\}$$

Przejścia stanów komórek w czasie następują są w oparciu regułę  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ , która ustala wartość  $\varphi_t(\vec{r}, t)$  przetwarzając stany komórek sąsiadujących:

$$\varphi_j(\vec{r}, t + \tau) = R_j \left( \varphi(\vec{r}, t), \varphi(\vec{r} + \vec{\delta}_1, t), \varphi(\vec{r} + \vec{\delta}_2, t), \dots, \varphi(\vec{r} + \vec{\delta}_q, t) \right)$$

gdzie  $\vec{r} + \vec{\delta}_q$  oznacza skończony zbiór sąsiadów  $\vec{r}$ .

Pozostaje jeszcze ustalenie formalnego zakresu sąsiedztwa dla komórki (rysunek 1). Wyróżniamy w tym względzie dwa zasadnicze typy sąsiedztw (Hoekstra, Kroc, Slood, 2010, s. 6–8):

- sąsiedztwo von Neumanna: zbiór czterech komórek na kierunkach odpowiadających czterem stronom świata (N, S, W, E).
- sąsiedztwo Moora: zbiór wszystkich ośmiu komórek okalających komórkę centralną.

$(i-1, j-1)$	$(i-1, j)$	$(i-1, j+1)$
$(i, j-1)$	$i, j$	$(i, j+1)$
$(i+1, j-1)$	$(i+1, j)$	$(i+1, j+1)$

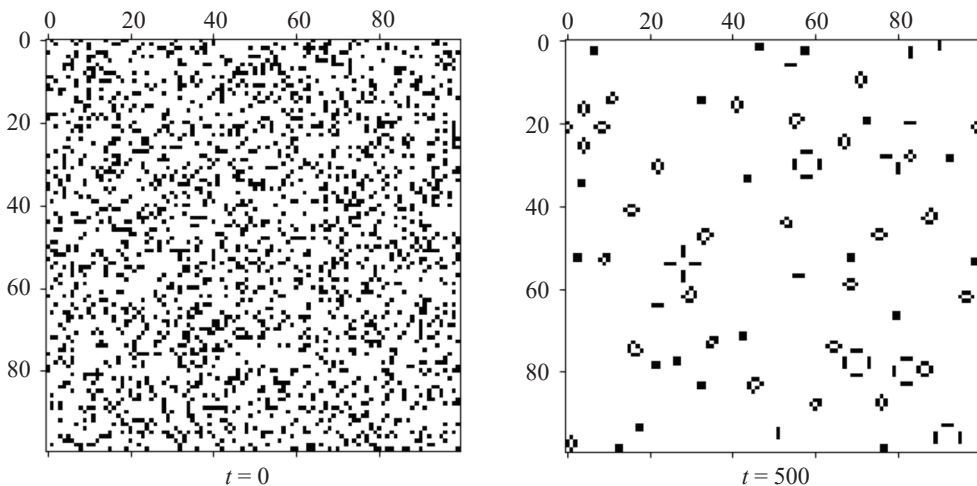
Rys. 1. Adresy sąsiedztw w automatach komórkowych

Źródło: Opracowanie własne.

Wspomniana już „Gra w życie” stanowi najbardziej znaną implementację tak zdefiniowanego automatu komórkowego. Komórki przyjmować mogą dwie wartości ze zbioru  $\{0, 1\}$  oznaczające odpowiednio komórkę „martwą” oraz „żywą”. W grze zastosowano sąsiedztwo Moore’a – ośmiu sąsiadów włączając w to komórki znajdujące się po przekątnej. Ewolucją stanów tak zaprojektowanego układu sterują następujące reguły (McIntosh, 2010, s. 17–20):

- 1) każda żywa komórka z maksimum trzema lub minimum dwiema żywymi komórkami w swoim sąsiedztwie przeżywa do kolejnej iteracji;
- 2) każda żywa komórka z czterema lub więcej żywymi komórkami w swoim sąsiedztwie umiera z powodu przeludnienia;
- 3) każda żywa komórka z mniej niż dwoma żywymi komórkami umiera z powodu nadmiernej izolacji;
- 4) każda martwa komórka, w sąsiedztwie której znajdują się trzy żywe komórki odżywa.

Stan początkowy symulacji wyznaczany jest za pomocą generatora liczb pseudolosowych<sup>1</sup>. Pojedyncza komórka stanowi obiekt matematyczny, którego zdolności „poznawcze” ograniczają się do spoglądania w swoje najbliższe otoczenie (obowiązuje periodyczność warunków brzegowych). Na podstawie zebranych informacji komórka podejmuje autonomiczną decyzję co do stanu jaki powinna przybrać po każdym cyklu obliczeniowym. Choć oddziaływanie każdego z obiektów ma zasięg lokalny, to w praktyce cały układ charakteryzuje się wysokim stopniem samoorganizacji w makroskali. Generowane po każdej iteracji układy komórek pozostających przy życiu cechuje powtarzalność i nieprzypadkowość pod kątem przybieranych form (rysunek 2). Obserwowane prawidłowości mogą budzić zdziwienie biorąc pod uwagę prostotę zachowań pojedynczych elementów na poziomie mikrostruktury. Jest to klasyczny przykład działania emergencji – z pozoru chaotyczny układ na drodze samoorganizacji prostych autonomicznych elementów ujawnia swoją złożoność.



Rys. 2. Gra w życie Conwaya – wizualizacja

**Źródło:** Opracowanie własne.

Automaty komórkowe narzucają szereg ograniczeń metodologicznych istotnych z punktu widzenia nauk społecznych. Komórka przyjmować może skończoną liczbę

<sup>1</sup> Stosowanie generatora liczb pseudolosowych to narzędzie często wykorzystywane w symulacjach komputerowych. Jest to element programu komputerowego, który generuje deterministyczny (nielosowy) ciąg bitów, który pod określonymi względami spełnia wymogi stawiane ciągom liczb uzyskiwanym ze źródła prawdziwie losowego. Uzyskane wyniki losowania są zgodne z określonym wcześniej rozkładem.

stanów jako tzw. FSM (*Finite State Machine*), ale nie jest w stanie agregować większej liczby parametrów, i na ich podstawie podejmować „inteligentnych” decyzji. Klasyczne automaty komórkowe nie nadają się więc do modelowania złożonych zjawisk społecznych. Nadal jednak pozostają ważnym narzędziem analitycznym dla badaczy zajmujących się w swojej pracy złożonymi procesami fizycznymi, w których kluczowe znaczenie ma przestrzeń i czas. Dla matematyków czy filozofów automaty komórkowe same w sobie stanowią przedmiot badań, jako wyjątkowy przykład dyskretnego modelu obliczeniowego przejawiającego cechy systemu złożonego (Lubiszewski, 2011).

Idea automatów komórkowych nie znalazła szerszego zastosowania w dziedzinie nauk społecznych, ale została na ich gruncie twórczo rozwinięta w ramach symulacji wieloagentowych. Koncepcja ta bazuje na modelu BDI (*Believes, Desires, Intentions*) opracowanym przez psychologa Michaela Bratmana. Symulacje implementowane w ramach tego podejścia zakładają użycie agentów symulacyjnych w miejsce statycznych komórek. Są to autonomiczne obiekty wyposażone w dodatkową warstwę abstrakcji w postaci złożonych heurystyk decyzyjnych (Elsenbroich, 2014, s. 81–85). Agent symulacyjny wyposażony jest więc w pewną formę „sztucznej inteligencji”, która pozwala mu na podejmowanie działań pod wpływem określonych bodźców pochodzących ze środowiska symulacyjnego. Praktyczna implementacja tej koncepcji była możliwa dzięki postępowi technologicznemu w dziedzinie informatyki. Szczególnie ważny był w tym względzie rozwój języków wysokiego poziomu, opartych na paradygmacie programowania obiektowego (OOP – *Object Oriented Programming*)<sup>2</sup>.

Agent symulacyjny to abstrakcyjny obiekt wyposażony w określony zestaw cech (pól) oraz zbiór zachowań (metod). Stanowi najczęściej reprezentację określonego podmiotu funkcjonującego w rzeczywistości społecznej (jednostki ludzkiej, konsumenta, wyborcy, grupy społecznej, instytucji, firmy, państwa itp.). Konstrukcja każdego z biorących udział w symulacji agentów bazuje na wspólnej klasie, jednak w toku symulacji każdy z nich zachowuje swój indywidualny charakter (heterogeniczność). Cechy i reguły zachowań agenta mogą ewoluować w sposób właściwy tylko dla niego. Agent umieszczony w środowisku symulacyjnym wchodzi bowiem w interakcje z innymi agentami, podejmuje autonomiczne decyzje w oparciu o przyjęte reguły, adaptuje się do zmian środowiskowych (Gilbert, Troitzsch, 2005, s. 172–178).

Agent symulacyjny wyposażony jest w umiejętność postrzegania i przetwarzania informacji nt. cech środowiska symulacyjnego, w którym funkcjonuje. Jest również w stanie dostrzegać stany agentów, z którymi dzieli to środowisko. Agent charakteryzuje się w tym wypadku ograniczoną racjonalnością, co oznacza, że dysponuje jedynie częściowym zasobem wiedzy na temat swojego otoczenia. Algorytm decyzyjny pozwala mu jednak podejmować określone działania, związane z poruszaniem się po przestrzeni symulacyjnej, a także wchodzeniem w interakcje z innymi agentami lub elementami (artefaktami) środowiska. Na bazie utrwalonych doświadczeń jest w stanie modyfikować przyjęte reguły zachowania oraz strategie postępowania (Gilbert, Salgado, 2013, s. 248–249).

Większość wieloagentowych modeli symulacyjnych ABM bazuje na formalnej definicji automatu komórkowego. Agenci operują więc na dwuwymiarowej siatce, wchodząc

<sup>2</sup> Kod programu wyrażony jest wtedy jako zbiór powiązanych ze sobą obiektów, czyli elementów łączących w sobie stan (dane) oraz zachowania (metody). Wspomniany model programowania odzwierciedla sposób, w jaki nasz mózg postrzega rzeczywisty świat (zob. Weisfeld, 2014).

w lokalne interakcje ze swoimi sąsiadami. Dzięki temu uzyskujemy warunki odzwierciedlające rzeczywisty świat, w którym czas i przestrzeń są ze sobą ściśle powiązane. Takie rozwiązanie pozwala również na wygenerowanie przystępnej wizualizacji obrazującej przebieg symulacji<sup>3</sup>.

Pionierem w zakresie wykorzystania w naukach społecznych modeli symulacyjnych opartych na podejściu agentowym był Thomas Schelling, który jako pierwszy dostrzegł ich potencjał w zakresie badania złożoności systemów ekonomiczno-społecznych. Wśród prekursorów budujących dorobek w tej dziedzinie wymienić można również politologa Roberta Axelroda, który zastosował w swoich modelach symulacyjnych elementy teorii gier. Wspomniani autorzy skupili się w swojej działalności na projektowaniu oraz implementowaniu modeli wieloagentowych, których logika bazowała na podstawowych pojęciach socjologicznych, takich jak: zgoda, konflikt, współpraca, rywalizacja, organizacja, kohezja, negocjacje. Określają one złożony charakter zachowań społecznych, stanowiąc punkt wyjścia dla formułowanych problemów badawczych (Kmieciak, 2013, s. 218–219). Przekraczali oni przy tym wąsko pojęte granice reprezentowanych przez siebie dyscyplin, sięgając po dorobek tak różnych dziedzin jak biologia ewolucyjna, antropologia kulturowa, psychologia, politologia, ekonomia czy kognitywistyka.

## Wybrane przykłady implementacji modeli symulacyjnych ABM

### a) model segregacji przestrzennej Schellinga<sup>4</sup>

Stworzony w latach siedemdziesiątych XX w. model segregacji przestrzennej autorstwa Thomasa Schellinga stanowił pierwszą udaną próbę wykorzystania metod obliczeniowych w celu zbadania złożonego problemu z zakresu nauk społecznych. Przykład ten do dzisiaj jest żywo dyskutowany i analizowany, albowiem dotyczy niezwykle ważnej i nadal aktualnej problematyki związanej z dyskryminacją na tle rasowym, religijnym lub narodowościowym. Otrzymane przez badacza wyniki rzuciły nowe światło na problem segregacji przestrzennej wśród mieszkańców dużych amerykańskich miast. Mniejszości etniczne, osiedlające się na terenach zurbanizowanych tworzyły wyraźne enklawy skupiające jednostki podobne do siebie pod względem koloru skóry, religii czy pochodzenia etnicznego. Schelling chciał sprawdzić, czy kryją się za tym zjawiskiem reguły matematyczne, które mogłyby przynajmniej częściowo wyjaśnić jego naturę (Gilbert, Troitzsch, 2005, s. 146–148). Posłużył się więc metodą symulacyjną, konstruując przy tym niezwykle prosty model. Chciał przy jego pomocy ocenić do jakiego stopnia segregacja przestrzenna, pojmowana jako zjawisko emergentne, jest rezultatem wyłącznie indywidualnych preferencji i uprzedzeń osób zamieszkujących dany obszar (Schelling, 1971, s. 147–148).

W klasycznej implementacji modelu Schellinga dysponujemy dyskretną przestrzenią symulacyjną w postaci dwuwymiarowej siatki o wymiarach  $N \times N$ , która zostaje w sposób

<sup>3</sup> Niekiedy zachodzi jednak potrzeba zastosowania bardziej abstrakcyjnej struktury takiej jak graf, która odzwierciedlałaby sposób funkcjonowania sieci społecznej. W tym wypadku wizualizacja środowiska symulacyjnego obejmowałaby zmiany geometrii krawędzi grafu.

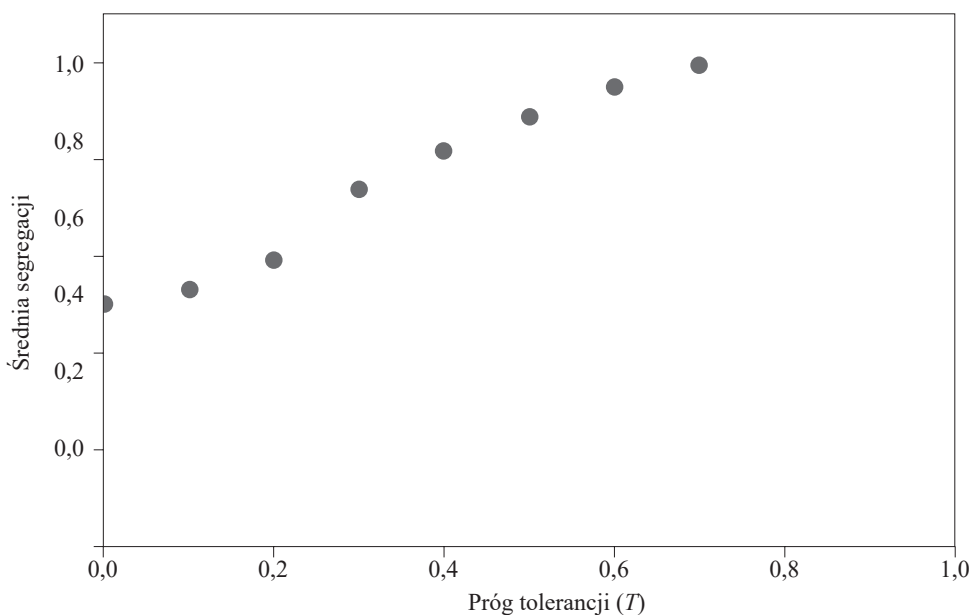
<sup>4</sup> Kod źródłowy programu dostępny pod adresem: <https://github.com/mkarczewski85/schelling-model-python>.



pseudolosowy wypełniona agentami symulacyjnymi w oparciu o przyjęty współczynnik stopnia zasiedlenia (np. 80/20). Populacja agentów dzieli się na dwie lub więcej grup, wyróżniających się jedną konkretną cechą (np. kolorem). Każdy agent posiada ten sam, ściśle określony próg tolerancji  $T$ , na bazie którego podejmuje decyzje o pozostaniu na swoim dotychczasowym miejscu lub relokacji. Reguła przejścia mówi, że agent jest zadowolony ze swojej aktualnej lokalizacji jeżeli ma w swoim najbliższym otoczeniu najwyżej  $T \in [0, 1]$  osobników innego koloru niż on. Jeżeli parametr  $T = 1$  (niski próg tolerancji) oznacza to, że agent będzie zadowolony ze swojego miejsca tylko w sytuacji, gdy w jego sąsiedztwie nie będzie żadnych „obcych”. W przeciwnym wypadku podejmie decyzję o relokacji do najbliższego losowo wybranego miejsca. W sytuacji, w której  $T = 0$  (wysoki próg tolerancji) agent będzie usatysfakcjonowany bez względu na obecność osobników innego koloru w swoim najbliższym otoczeniu. Po każdej iteracji indywidualny agent dokonuje ewaluacji swojego położenia, kształtując tym samym zmiany układu na poziomie makrostruktury (Schelling, 1971, s. 154–158; Downey, 2016, s. 142–147).

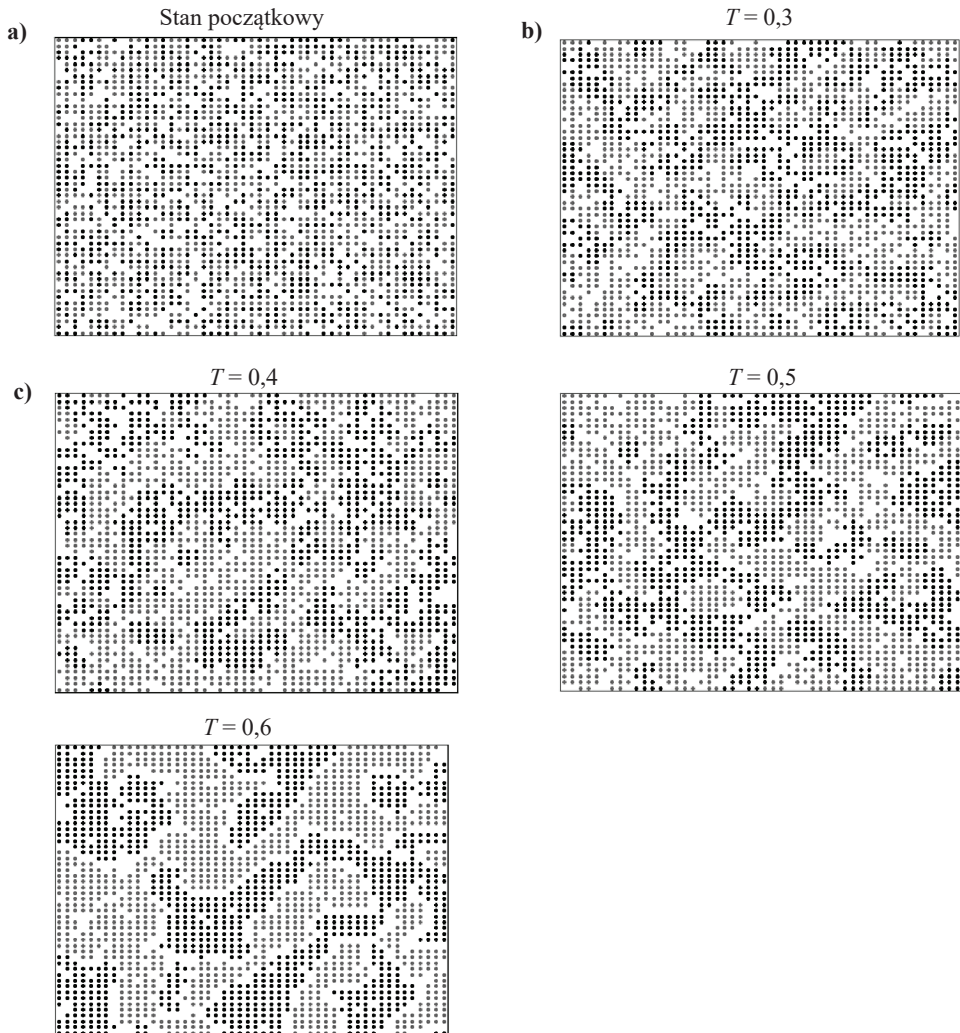
Symulacja powtarzana się dla różnych wartości  $T$  przynosi zaskakujące rezultaty. W sytuacji, gdy próg tolerancji jest relatywnie wysoki ( $T < 0,3$ ), układ zachowuje swój nieuporządkowany charakter. Ponadto, łatwo osiąga równowagę, ponieważ liczba agentów nieusatysfakcjonowanych swoim sąsiedztwem szybko spada do zera. Sytuacja zmienia się gdy próg tolerancji osiąga wartość krytyczną  $T_k \approx 0,3$ . Obserwujemy wtedy emergencję w postaci wyraźnych enklaw grupujących agentów reprezentujących każdy z kolorów (rysunek 3b). Układ traci swój pierwotny nieuporządkowany charakter. Wraz z obniżaniem progu tolerancji efekt staje się wyraźniejszy i lepiej dostrzegalny (rysunek 3c). Obrazuje to wykres 1, na którym zestawiono średni poziom segregacji

Wykres 1. Model segregacji Schellinga – wyniki symulacji



Źródło: Opracowanie własne.

z przyjętym w trakcie symulacji progiem tolerancji. Przedstawione dane dotyczą ośmiu niezależnych symulacji, w których  $T$  przybierał po kolei wartości od 0 do 0,8. Widać tu wyraźny przeskok w momencie  $T = 0,3$ . Jest to tzw. punkt krytyczny (*tipping point*), po przekroczeniu którego dochodzi do wyraźnej segregacji przestrzennej agentów symulacyjnych. Dalsze zmniejszanie progu tolerancji nadal wpływa na układ, ale nie obserwujemy już tak wyraźnego skoku w stopniu segregacji elementów.



Rys. 3. Model segregacji przestrzennej Schellinga – wizualizacja

**Źródło:** Opracowanie własne.

Pojawia się w tym miejscu pytanie w jaki sposób powinniśmy interpretować wyniki tej symulacji w kontekście postawionego problemu. Stworzony przez Schellinga model wydaje się być trywialny w swojej konstrukcji. Opiera się przy tym na wyso-



kiej abstrakcji, która nie pokrywa się z potoczną wiedzą o świecie. Schelling pokazał nam jednak pewną właściwość systemową. Model udowadnia, że nawet niewielka preferencja etniczna, od której uzależniamy nasze wybory mieszkaniowe, prowadzi może do głębokiej i trwałej segregacji, której widocznym efektem są etniczne enklawy w obrębie dużych miast o złożonej kompozycji społecznej. Stosunkowo wysoki poziom rzeczywistej tolerancji w ramach danej społeczności może nie uchronić jej przed trwałą segregacją.

Model Schellinga można implementować na wiele różnych sposobów, jak również modyfikować jego założenia w oparciu o dodatkowe parametry. Nadal jest on żywo dyskutowany i analizowany przez socjologów czy ekonomistów zajmujących się tematyką dyskryminacyjną.

#### b) model ewolucji postaw etnocentrycznych Axelroda-Hammonda<sup>5</sup>

Teoria gier to specyficzny dział matematyki dyskretnej, dostarczający przydatnych narzędzi analitycznych, pozwalających na badanie optymalnych zachowań skupionych wokół sytuacji konfliktowych. Z dorobku teorii gier czerpią więc przede wszystkim ekonomiści i politolodzy, dla których rywalizacja i konflikt interesów stanowią jedne z kluczowych kategorii badawczych (zob. Pietraś, 1997). Podstawowym ograniczeniem klasycznych postaci teorii gier jest jednak założenie, że biorące w grze podmioty są w pełni racjonalne, dysponują pełną informacją, a także są całkowicie świadome źródeł swoich decyzji. Stanowisko to od początku było nie do zaakceptowania dla przedstawicieli biologii ewolucyjnej, dla których pojęcia świadomej i racjonalnej decyzji kłóć się z podstawowymi założeniami teorii doboru naturalnego. Chcąc przewyciężyć to ograniczenie, John Maynard Smith zmodyfikował klasyczną postać teorii gier, wyposażając graczy w strategię oparte na cechach dziedzicznych. Na bazie prowadzonych przez niego badań rozwinęła się całkiem nowa dziedzina: ewolucyjna teoria gier. Pozwoliła ona lepiej zrozumieć niektóre zachowania społeczne zwierząt, których pochodzenia nie była wcześniej w stanie wyjaśnić klasyczna genetyka populacyjna, takie jak altruizm czy współpraca międzygatunkowa (Easley, Kleinberg, 2010, s. 209–227).

Badania w zakresie ewolucyjnej teorii gier stanowiły inspirację dla politologa Roberta Axelroda, zajmującego się problematyką politycznych procesów decyzyjnych. Badacz przyjął założenie, że źródeł elementarnych zachowań społecznych w ramach gatunku ludzkiego szukać należy w kontekście działania sił doboru naturalnego (Axelrod, 1997). Razem z biologiem Wiliame D. Hamiltonem zaangażował się w badania nt. znaczenia tzw. zachowań kooperatywnych dla rozwoju złożonych form organizacji społecznej. W 1980 r. zorganizował turniej, do którego zaprosił naukowców zajmujących się teorią gier. Ich zadaniem było napisanie programu komputerowego implementującego strategię gry w ramach tzw. iterowanego dylematu więźnia (*prisoner's dilemma*). Zestawienie wyników turnieju wykazało, że najczęściej korzyści przynosiły strategię oparte na chęci kooperacji i przewidujące wybaczenie zdrad ze strony innych graczy. Axelrod pokazał w ten sposób, że odwzajemniony altruizm uznać można za strategię ewolucyjnie stabil-

<sup>5</sup> Kod źródłowy programu dostępny pod adresem: <https://github.com/mkarczewski85/axelrod-model-python>.

ną, ponieważ mogła wykształcić się w oparciu o selekcję naturalną (Axelrod, Hamilton, 1981, s. 1390–1396; Axelrod, 2006).

Rezultaty eksperymentu Axelroda wniosły ogromny wkład do wiedzy na temat ewolucji gatunku ludzkiego. Nie wyjaśniły jednak źródeł zachowań etnocentrycznych, w ramach których preferencje grupowe wyraźnie osłabiają ogólną skłonność do altruizmu i współpracy. Zachowania kooperatywne ograniczane są do przedstawicieli tej samej grupy, wyodrębnionej w oparciu o rozmaite czynniki pochodzenia biologicznego i kulturowego. Axelrod, we współpracy z Rossem Hammondem, stworzył komputerowy model symulacyjny, który dostarcza nowej wiedzy na ten temat.

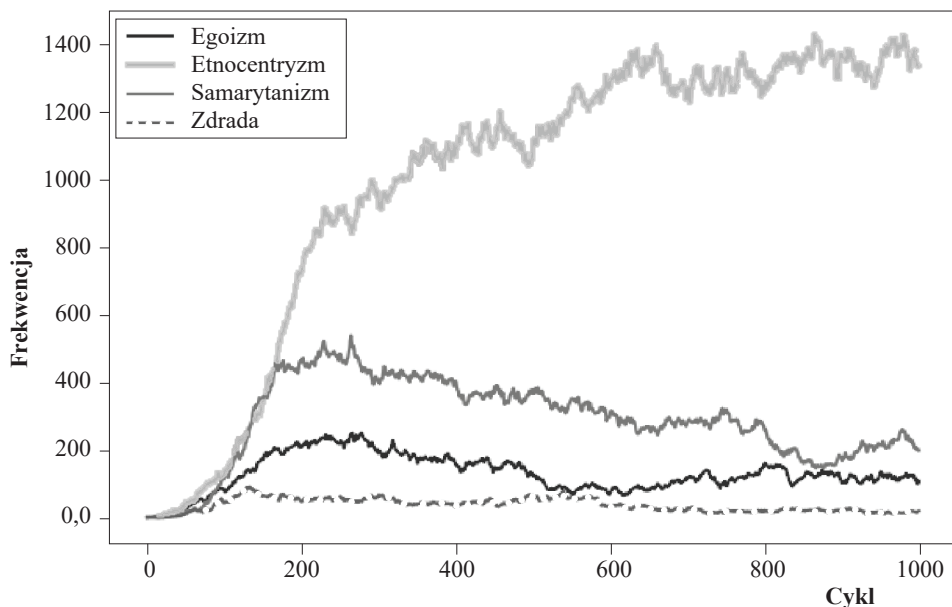
W modelu Axelroda-Hammonda zjawisko etnocentryzmu zoperacjonalizowane zostało poprzez nadanie agentom symulacyjnym szereg dziedzicznych cech, które różnicują formułowane przez nich strategie na kooperatywne i niekooperatywne. Symulacja implementuje nieiteracyjną postać wspomnianej już gry opartej na tzw. dylemacie więźnia, przez co strategie nie mogą być warunkowane w oparciu o zasadę wzajemności. Przestrzeń symulacyjną stanowi abstrakcyjna dwuwymiarowa macierz o wymiarach  $N \times N$ , na której dochodzi do interakcji. Propagacja strategii ma charakter lokalny, co oznacza, że indywidualny agent może wchodzić w kontakt jedynie ze swoim bezpośrednim sąsiadem. Agenci wyposażeni są w cztery dziedziczne cechy: a) znacznik (*tag*), czyli cecha określająca przynależność do konkretnej grupy, która na potrzeby symulacji oznaczać będzie kolor, reprezentujący przynależność do jednej z czterech grup etnicznych; b) wrodzoną skłonność do udzielenia pomocy członkom swojej własnej grupy, implementowana jako wartość boolowska (prawda lub fałsz); c) wrodzona skłonność do udzielania pomocy przedstawicielom innych niż własna grup, która również implementowana jest jako wartość boolowska (Axelrod, Hammond, 2006, s. 3–4).

Cechy 2 i 3 są kluczowe dla zrozumienia opisywanego modelu symulacyjnego. Wartość dla każdej z nich generowana jest pseudolosowo, co oznacza, że wszystkich agentów podzielić można na cztery kategorie reprezentujące obierane przez nich strategie: a) Etnocentryk – pomaga wyłącznie swoim; b) Samarytanin – pomaga wszystkim; c) Zdrajca – pomaga wyłącznie obcym; d) Egoista – „pasażer na gapę”, który nie pomaga, a jedynie przyjmuje pomoc od innych. Algorytm zakłada cztery fazy składające się na pojedynczy cykl symulacyjny (Axelrod, Hammond, 2006, s. 9):

- 1) imigracja – pojedynczy agent zasiedla losowo wybraną wolną komórkę. Agent posiada na starcie potencjał reprodukcyjny (PTR) na poziomie 12%;
- 2) interakcja – każda z sąsiadujących ze sobą par agentów wchodzi w relację, sprawdzając się do udzielenia bądź nieudzielenia jednorazowej pomocy sąsiadowi. Każdy agent stosuje w wypadku właściwą sobie strategię. Ceną za udzielenie pomocy jest spadek wartości PTR o 1%. Agent, który otrzymał pomoc notuje z kolei wzrost swojego potencjału reprodukcyjnego o 3%;
- 3) reprodukcja – agent zasiedlający losowo wybraną komórkę dostaje szansę na pozostawienie po sobie potomstwa w oparciu o posiadany w danej chwili potencjał reprodukcyjny. Każda z cech potomstwa może być w pełni odziedziczona lub ulec mutacji, której prawdopodobieństwo wynosi 0,5%;
- 4) śmierć – prawdopodobieństwo śmierci każdego agenta na koniec pojedynczego cyklu wynosi 10%.

Wyniki tak zaprojektowanej symulacji wydają się potwierdzać hipotezę mówiącą o ewolucyjnych źródłach zachowań etnocentrycznych. Analiza danych zebranych w toku dziesięciu niezależnych rund symulacyjnych, na które składało się 1000 następujących po sobie cykli, jednoznacznie wskazuje, że wraz z ewolucją układu etnocentryzm staje się strategią dominującą (wykres 2).

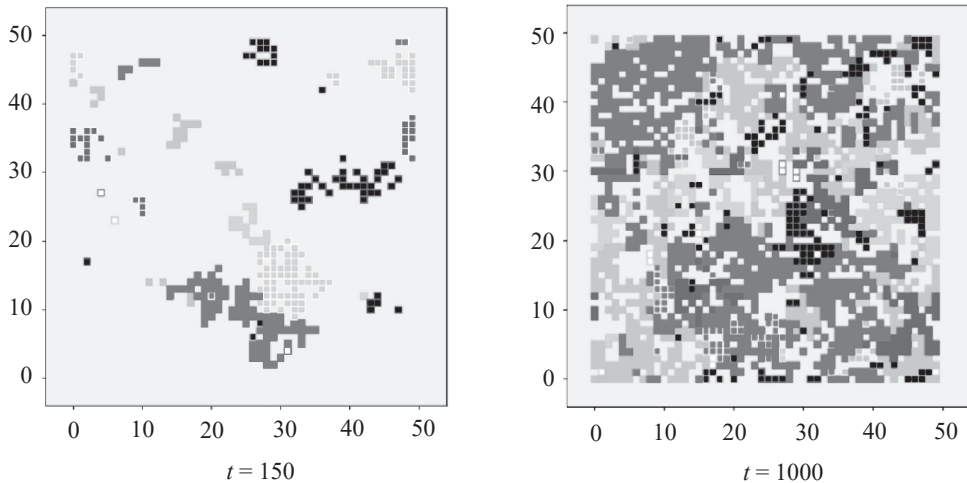
**Wykres 2. Wyniki symulacji opartej na modelu Axelroda-Hammonda**



**Źródło:** Opracowanie własne.

Postawa oparta na etnocentryzmie daje w tym wypadku przewagę ewolucyjną, ponieważ pozwala populacji skuteczniej ograniczać straty wywołane przez obecność jednostek egoistycznych oraz tych, które dopuszczają się zdrady. Strategia samarytańska okazuje się być pod tym względem zbyt kosztowna w dłuższej perspektywie, ponieważ stosujące ją jednostki zmuszone są pomagać każdemu, nawet sąsiadom, którzy nigdy nie odwzajemnią okazanej pomocy. W efekcie kolonie etnocentrycznych osobników reprezentujących ten sam gatunek rosną szybciej, opanowując coraz większe połacie przestrzeni symulacyjnej (rysunek 4).

Model Axelroda-Hammonda ukazuje nam niezwykle interesujące zjawisko. Etnocentryzm jako dominująca postawa wyłoniona na drodze selekcji naturalnej, pozwolił na propagację zachowań kooperatywnych, które w dużej mierze zadecydowały o przetrwaniu gatunku. Kluczowe znaczenie miała w tym wypadku umiejętność odróżniania „swoich” od „obcych”. W ramach omawianego modelu symulacyjnego zastosowano jedną abstrakcyjną cechę grupującą agentów (kolor). W rzeczywistości społecznej różnice mogą obejmować zarówno cechy biologiczne (np. kolor skóry), jak również wszelkiego rodzaju konstrukty społeczne, takie jak przynależność narodowa czy wyznawana religia. Ewolucja kulturowa wyposażała ludzkość w społeczne mechanizmy sprzyjające przy-



Rys. 4. Symulacja oparta na modelu Axelroda-Hammonda – wizualizacja

**Legenda:** pełny kolor – etnocentryzm; czarny z kolorową ramką – egoizm; biały z kolorową ramką – zdrada, kolor z białą ramką – samarytanizm.

**Źródło:** Opracowanie własne.

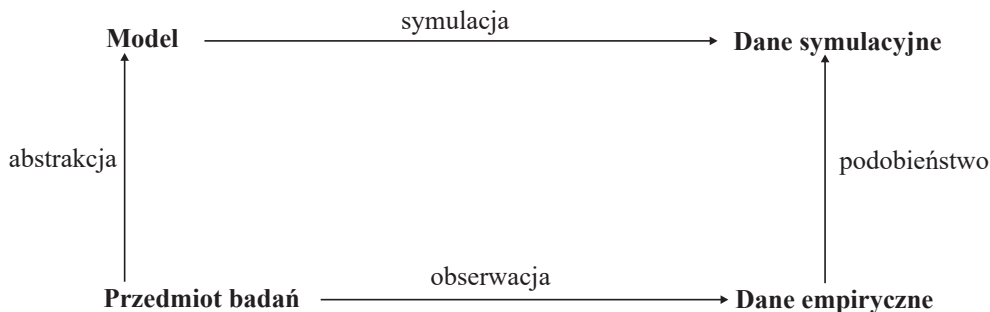
mowaniu strategii kooperatywnych (normy społeczne, kontrakty, instytucje). Osłabiają one naszą biologiczną predyspozycję do demonstrowania zachowań etnocentrycznych. Jednak w sytuacji, w której mechanizmy te z różnych przyczyn zanikają (kryzysy gospodarcze, wojny, katastrofy naturalne), zaczynają dominować strategie oparte na tożsamości grupowej.

### Problemy natury metodologiczno-epistemologicznej

Symulacja komputerowa, jako narzędzie badawcze, nigdy nie będzie w stanie zastąpić metod empirycznych. Nie takie jest zresztą ich przeznaczenie. Symulacja może być pomocna tam gdzie badacz nie jest w sposób kontrolowany odtworzyć przebiegu jakiegoś zjawiska. W przypadku nauk społecznych problem ten pojawia się nader często. Pozostaje jednak pytanie czy symulacje komputerowe, oparte na arbitralnie dobranych warstwach abstrakcji, są w stanie odkryć przed nami jakąś część prawdy o otaczającym nas świecie. Odpowiedź na to pytanie nie jest łatwa, bowiem epistemologiczny status symulacji nadal pozostaje niejasny (Kmieciak, 2013, s. 222).

Sens posługiwania się modelami symulacyjnymi wymyka się klasycznemu ujęciu filozofii nauki, która opiera się na tradycyjnie rozumianych pojęciach teorii, eksperymentu oraz obserwacji jako metody naukowej (Kmieciak, 2013, s. 223). Model symulacyjny dostarcza nam informacji wskazujących na istnienie pewnych inferencji logicznych mogących stanowić hipotetyczne wyjaśnienie dla postawionego wcześniej pytania badawczego. Zależności te nie mogą być jednak traktowane w charakterze związków przyczynowo skutkowych zachodzących w rzeczywistym świecie (rysunek 5). Proces formułowania problemu badawczego sprowadza się do zakodowania struktury systemu

naturalnego w formie abstrakcji programu komputerowego, który posłużyć może następnie w charakterze systemu formalnego. Uzyskany rezultat należy następnie zinterpretować w sposób pozwalający odnieść je do świata materialnego. Wiąże się to najczęściej z koniecznością porównania danych symulacyjnych z zebrany wcześniej materiałem empirycznym (Gilbert, Troitzsch, 2005, s. 15–26).



Rys. 5. Symulacja jako metoda badawcza

**Źródło:** Gilbert, Troitzsch, 2005, s. 17.

Wyjątkową zaletą symulacji opartych na modelach wieloagentowych jest ich zdolność do ujawniania własności emergentnych, charakteryzujących systemy złożone. Przytoczone w niniejszym artykule przykłady pokazują bowiem, że konkretne cechy elementów mikrostruktury badanego systemu nie muszą znajdować odzwierciedlenia na wyższych poziomach jego organizacji (Bar-Yam, 1997, s. 1–5). Zjawisko to dotyczy w dużym stopniu systemów społecznych, które zachowują się w sposób niedeterministyczny. Próżno więc w dorobku socjologii, politologii czy psychologii szukać teorii naukowych opartych na bezwzględnie obowiązujących prawach. Stosowanie na gruncie wspomnianych dyscyplin metod bazujących na analitycznym redukcjonizmie nie przyniesie oczekiwanych rezultatów. Nauki społeczne mogą jedynie imitować metodologię właściwą części nauk przyrodniczych, z fizyką na czele. Richard Feynman określił to zjawisko mianem nauki spod znaku „kultu cargo”, w której badacze oszukują samych siebie, wierząc w skuteczność stosowanych metod, a co za tym idzie w prawdziwość poczynionych ustaleń (por. Feynman, 2007, s. 339–347).

Nie należy jednak traktować komputerowych modeli symulacyjnych jako uniwersalnej recepty na wszystkie problemy nauk społecznych. Nawet najlepiej zaprojektowane modele symulacyjne nie odkryją przed nami całej prawdy o otaczającej nas rzeczywistości. Ich zastosowanie ogranicza się do wąskiego spektrum fundamentalnych zagadnień natury antropologicznej. Nerozstrzygniętym pozostaje również problem wyznaczenia kryteriów prawdziwości symulacji. Każdy model opiera się bowiem na określonym systemie reprezentacji ludzkich zachowań, którego zasadność może być w każdej chwili podważona. Działanie ludzkiego umysłu nadal bowiem skrywa przed współczesną nauką wiele tajemnic. Dlatego, formułując model symulacyjny musimy oprzeć go na właściwie rozpoznanych cechach natury ludzkiej (Kmieciak, 2013, s. 224). Jest to podstawowy czynnik odróżniający symulację naukową od gry komputerowej.

### Wnioski końcowe

Symulacje komputerowe oparte na modelach wieloagentowych zaliczyć można do szerokiego katalogu technik charakterystycznych dla obszaru tzw. humanistyki cyfrowej (*digital humanities*). Jest to całkowicie nowy paradygmat badawczy, który zdobywa coraz większe uznanie wśród przedstawicieli rozmaitych dyscyplin zajmujących się badaniami humanistycznymi i społecznymi, w których tradycyjne praktyki i dyrektywy badawcze stroniły jak dotąd od projektowania namacalnych narzędzi badawczych, podobnych do tych jakie wykorzystywane są w naukach ścisłych. Humanistyka cyfrowa skupia się na badaniu ludzkiej kultury oraz życia społecznego przy wsparciu ze strony dedykowanych narzędzi świata cyfrowego (Bomba, 2013, s. 57).

Same metody symulacji komputerowych będą zyskiwały na znaczeniu wraz z postępem technologicznym. Nie chodzi tu wyłącznie o wzrost możliwości obliczeniowych współczesnych komputerów. Szybki rozwój technologii zbiorczo określanymi mianem sztucznej inteligencji (AI – *Artificial Intelligence*) może zrewolucjonizować wiele obszarów naszego codziennego życia. Technologie te mogą również zmienić sposób uprawiania nauki. Przyszłe symulacje komputerowe budowane będą bowiem przy wykorzystaniu systemów opartych na logice rozmytej, pozwalającej maszynie na uczenie się i podejmowanie inteligentnych decyzji w pełnym znaczeniu tego słowa. Nadchodząca rewolucja technologiczna otwiera więc przez naukami społecznymi całkiem nowe perspektywy dla dalszego rozwoju.

### Bibliografia

- Axelrod R. M. (1997), *The complexity of cooperation: agent-based models of competition and collaboration*, Princeton.
- Axelrod R. M. (2006), *The evolution of cooperation*, Cambridge.
- Axelrod R. M., Hamilton W. D. (1981), *The Evolution of Cooperation*, „Science”, New Series, vol. 211, no. 4489.
- Axelrod R. M., Hammond R. A. (2006), *The Evolution of Ethnocentrism*, „Journal of Conflict Resolution”, vol. 50, no. 6.
- Bar-Yam Y. (1997), *Dynamics of complex systems*, Addison-Wesley.
- Benenson I., Torrens P. M. (2005), *Geosimulation: Automata-based Modeling of Urban Phenomena*, San Francisco.
- Bomba R. (2013), *Narzędzia cyfrowe jako wyznacznik nowego paradygmatu badań humanistycznych*, w: *Zwrot cyfrowy w humanistyce*, red. A. Radomski, R. Bomba, Lublin.
- Chopard B. (1995), *Complexity and Cellular Automata models*, w: *Physics of Complexity*, red. S. Ciliberto, T. Dauxois, M. Droz, Singapur.
- Downey A. B. (2016), *Think Complexity*, Needham.
- Epstein J. M. (2005), *Agent-Based Computational Models and Generative Social Science*, w: *Generative Social Science. Studies in Agent-Based Computational Modeling*, red. J. M. Epstein, Princeton.
- Epstein J. M., Axtell R. (1996), *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, Brookings Institution Press, The MIT Press.
- Feynman R. P., Leighton R. (2007), *„Pan raczy żartować, panie Feynman!”*. *Przypadki ciekawego człowieka*, Kraków.



- Gilbert N., Troitzsch K. G. (2005), *Simulation for the Social Scientist*, New York.
- Hoekstra A., Kroc J., Sloot P. (2010), *Introduction to Modeling of Complex Systems Using Cellular Automata*, w: *Simulating Complex Systems by Cellular Automata*, red. A. Hoekstra, J. Kroc, P. Sloot, London.
- Kmiecik A. (2013), *Filozoficzne aspekty komputerowych badań symulacyjnych w naukach społecznych*, „Filo – Sofija”, nr 20 (1).
- Lichtenstein B. (2014), *Generative Emergence: A New Discipline of Organizational, Entrepreneurial, and Social Innovation*, Oxford.
- Lubiszewski D. (2011), *Wylaniające się prawa fizyki*, „Diametros”, no. 28 (June).
- McIntosh H. V. (2010), *Conway's Life*, w: *Game of Life Cellular Automata*, red. A. Adamatzky, London.
- Miller J. H., Page S. E. (2007), *Complex Adaptive Systems an introduction to computational models of social life*, Princeton.
- Neumann J. von (1963), *John Von Neumann Collected Works*, vol. V, Oxford.
- Pietraś Z. J. (1997), *Teoria gier jako sposób analizy procesów podejmowania decyzji politycznych*, Lublin.
- Salgado M., Gilbert N. (2013), *Agent Based Modelling*, w: *Handbook of Quantitative Methods for Educational Research*, red. T. Teo, Rotterdam–Boston–Taipei.
- Sawyer R. (2005), *Social Emergence Societies as Complex Systems*, Cambridge.
- Schelling T. C. (1971), *Dynamic Models of Segregation*, „Journal of Mathematical Sociology”, vol. 1.
- Wainwright R. (2010), *Conway's Game of Life: Early Personal Recollections*, w: *Game of Life Cellular Automata*, red. A. Adamatzky, London.
- Weisfeld M. (2014), *Myślenie obiektowe w programowaniu*, Gliwice.

---

## Agent-based simulation models (ABM) as a research tool in social science

### Summary

This paper discusses practical use of computer simulation techniques in social sciences, with particular reference to political science and sociology. The main subject of the research were agent-based simulation models (ABM), which is so far the most commonly used simulation technique in various disciplines, such as economics, sociology, anthropology, and behavioural sciences. Author provides an overview of two agent-based simulation models (the Schelling spatial segregation model and Axelrod-Hammond's evolution of ethnocentrism model) with original implementations written in Python 3.6. The aim was to verify all the findings claimed by cited authors, as well as evaluate applied methodology. This paper emphasizes some research issues that need to be addressed with regard to veracity of simulation models in social sciences. It explains the necessary conditions for agent-based simulations to be recognized as genuine research tool.

**Key words:** simulation, model, ABM, Axelrod, Schelling

