Multiagentní modelování v sociologii: úvod do tématu*

Anna Krčková**

Fakulta sociálních věd, Univerzita Karlova v Praze

Multi-agent modelling in sociology: introduction

Abstract: *The purpose of this article is to introduce multi-agent modelling as an area of research that has developed rapidly in sociology over the last fifteen years. This article starts by outlining some characteristics of multi-agent modelling and then covers the history of sociological component of complexity science. In the following part, the fundamental concepts used in multi-agent modelling such as model, agent, environment and emergence are defined. Thereafter, the article focuses on the application of multi-agent modelling in sociology and identifies specific areas where it might be used productively. An illustrative example of a multi-agent model called 'Slumulation' that explores how slums emerge in the city is described. Finally, the advantages and limits of this approach are summarized.*

Key words: Multi-agent modelling, agent-based modelling, social simulation.

Data a výzkum - SDA Info 2013, Vol. 7, No. 2: 167-186.

DOI: <http://dx.doi.org/10.13060/23362391.2013.127.2.38>

(c) Sociologický ústav AV ČR, v.v.i., Praha 2013.

Úvod

Multiagentní modelování je nová počítačová simulační metoda, která se v současnosti úspěšně rozvíjí v rámci mnoha různých disciplín a je stále častěji používána k popisu a vysvětlení sociologických fenoménů [Sawyer 2003: 325]. Vzhledem k tomu, že se multiagentní modelování dostalo do sociologie z jiných věd, můžeme ho považovat za externí metodologickou inovaci [Schenk

* Článek byl podpořen z prostředků grantu GAČR č. P404/11/0949 a Specifického výzkumu ISS FSV UK. Tento článek byl také podpořen projektem Specifického vysokoškolského výzkumu SVV 2014 260 112.

** Veškerou korespondenci zasílejte na e-mail: anna.krckova@gmail.com.

2011: 6]. Umožňuje simulovat sociální procesy a může nám pomoci těmto sociálním procesům porozumět [Gilbert 2004: 1]. Přestože do sociálních věd vstoupilo modelování již před několika desítkami let¹, tato oblast se začala rychle rozvíjet až v posledních patnácti letech [Axelrod 2005: 2]. Možná proto má podle Sawyera [2003: 326] mnoho sociologů stále dojem, že standardní statistická analýza neboli EBM (*equation-based modelling*)² je jediným počítačovým simulačním nástrojem, který mají k dispozici.

Hlavním důvodem, proč je v současnosti multiagentní modelování tak populární, je to, že umožňuje simulovat a zkoumat organizované komplexní systémy, které jsou tvořeny mnoha interakcemi subsystémů [Heath, Hill, Ciarallo 2009: 1.1]. Protože terminologie včetně názvu této disciplíny ještě není zcela specifikována³, budu v tomto článku používat označení multiagentní modelování.

Vzhledem k tomu, že multiagentní modelování u nás není moc známé, pokusím se jej v tomto článku představit. Nejdřív se budu zabývat tím, jak se do sociologie dostalo jako součást vědy o komplexitě. V další části definuji nejdůležitější pojmy – model, agent, prostředí a emergence. Dále se zaměřím na možnosti využití multiagentního modelování v sociologii. Poté, co krátce nastíním, jak se multiagentní modely vytvářejí, popíšu konkrétní aplikaci tohoto přístupu, který zkoumá problematiku slumů ve městě. Na závěr uvedu základní výhody a limity tohoto přístupu.

Historie multiagentního modelování a sociologie

Modelování jako takové je běžnou součástí našich životů. Můžeme říci, že kdykoli si představujeme a snažíme se předpovědět, jak by se mohla vyvíjet nějaká sociální dynamika (například epidemie, válka nebo migrace), vytváříme nějaký model [Epstein 2008: 1.2]. Multiagentní modelování jako výzkumná technika slouží vědcům už dlouhá desetiletí jako významný nástroj v přírodních vědách od astronomie k biochemii. V sociálních vědách byla až do nedávné doby opomíjena [Gilbert 2008: xi]. Do sociologie se multiagentní modelování dostalo v průběhu 90. let 20. století. V tomto období se techniky multiagentního modelování rozvinuly natolik, že se staly pro sociology užitečným nástrojem. Od té doby se tento přístup jako nástroj pro sociální simulace začal v sociologii rychle rozvíjet⁴ [Sawyer 2003: 325–326]. Podle Gilberta

1 Gilbert [2008: 4] uvádí, že technika modelování měla v sociálních vědách místo dříve, než byly vymyšleny první počítače. Jeden z prvních modelů v sociálních vědách vytvořil Phillips [1950], který vymyslel hydraulický model národních ekonomických procesů.

2 Multiagentní modelování a EBM se liší v několika úrovních a každá z těchto dvou technik má odlišné pole využití. Přehledné porovnání lze nalézt u Schenka [2011: 16–21].

3 Kromě multiagentního modelování se používají označení artificial society, complex system, agent-based model, multi-agent model, individual-based model, bottom-up model, adaptive system, computational model [Axelrod 2005: 11; Schenk 2011: 6].

4 Vývoj počtu publikovaných článků za rok v letech 1998–2008 ukazuje, jak se zájem o multiagentní modelování zvyšoval [Heath, Hill, Ciarallo 2009: 2.6].

[2004: 1] přišel v 90. letech zlom, protože v této době „... počítačové programy nabídly možnost vytvářet ‚umělé‘ společnosti, ve kterých mohly být jedinci a kolektivní aktéři jako organizace reprezentováni přímo a výsledek jejich interakcí mohl být pozorován“.

Sociologie jako věda o komplexitě

V sociologii, na rozdíl od přírodních věd, nemůžeme společnost zkoumat tak, že ji rozdělíme na jednotlivé části, jejichž chování se budeme snažit porozumět. Západní sociologie jako věda zabývající se společností je a vždy byla vědou o komplexitě, protože lidská společnost je komplexní systém, který se neustále mění. Probíhá v ní mnoho nelineárních interakcí mezi jejími částmi (lidmi). Chování společnosti pak takzvaně „emerguje“ (*emerge*) z jednání jejích částí. Lidé jsou navíc schopni tuto emergenci sledovat a reagovat na ni. Další charakteristikou společnosti je to, že vzniká z dynamických procesů, tedy z neustálé změny [Gilbert 2004: 3].

Castellani a Hafferty [2009] ve své knize mapují přehled systémové tradice v sociologii, která hrála důležitou roli ve vzniku vědy o komplexitě (*complexity science*), jejíž součástí multiagentní modelování je. V tomto přehledu se zaměřují především na tři hlavní období: klasické období spojené se vznikem sociologie; éru strukturního funkcionalismu, ve které hrál nejdůležitější roli Talcott Parsons a nově vzniklá kybernetika a systémová věda; a období tzv. obratu ke komplexitě.

Přestože se multiagentní modelování zdá být zcela novým přístupem, jeho základy byly v sociologii položeny už během jejího vzniku. Základním tématem zakladatelů sociologie Augusta Comteho, Herberta Spencera, Karla Marxe, Maxe Webera, Émila Durkheima a Vilfreda Pareta bylo zkoumat, jak se v souvislosti s proměnou západní společnosti z tradiční na industriální proměňuje a roste její komplexita. Výše vyjmenované klasické představitelé sociologie označují autoři za „systémové myslitele“ (*system thinkers*), a to ze tří důvodů:

- 1) svou práci konceptualizovali jako přímou odpověď na rostoucí komplexnost západní společnosti⁵ a cílem jejich sociologického bádání bylo pochopit kvalitativní změny v komplexitě společnosti,
- 2) považovali západní společnost za systém, jehož komplexita se vyvíjela a
- 3) jejich úspěchy⁶ a neúspěchy mohou pomoci současným sociologům, jak

5 Nejvýstižněji je tato konceptualizace obsažena v evolucionismu, což je názor, že společnosti se v čase vyvíjejí z jednodušší ke složitější formě [Castellani, Hafferty 2009: 6].

6 Skvělým příkladem úspěchu je Paretův princip neboli pravidlo 80/20. Pareto zkoumal rozdělení bohatství v evropských zemích a zjistil, že 80 % půdy vlastní 20 % populace. Toto pravidlo, které lze převést na obecnou zásadu, že 80 % všech výsledků vzniká z 20 % příčin, bylo později úspěšně použito v mnoha oblastech výzkumu (zejména matematice, ekonomice a biologii). Ve vědě o komplexitě je pravidlo 80/20 využito ve zkoumání struktury a dynamiky mnoha komplexních systémů, které přes svůj rozsah nejsou zcela chaotické, ale mají tendenci k určité samoorganizaci [Castellani, Hafferty 2009: 9–12].

nejlépe přemýšlet o komplexitě západní společnosti ze systémové perspektivy.

Tito autoři byli později (ve 20. letech 20. století) označeni za zakladatele systémové tradice v sociologii. Zmínění myslitelé mají nesporně vliv na sociologii dodnes. Systémová tradice však v první polovině 20. století z velké části upadla do zapomnění jako neužitečná.

Systémová tradice byla o zhruba čtyřicet let později znovu objevena Talcottem Parsonsem a jeho strukturálním funkcionalismem. Parsons svou sociologickou teorii založil na systémové tradici evropské sociologie, zajímal se však také o nově rozvíjející se oblasti, a to kybernetiku a systémovou vědu, ve kterých se snažil své teoretické snahy založit. Tím přispěl k propojení sociologie a kybernetiky – hlavní intelektuální předchůdkyně vědy o komplexitě. Parsonsovy snahy měly i institucionální povahu. Na Harvardově univerzitě založil Katedru sociálních vztahů (*Department of Social Relations*), která měla interdisciplinární charakter. Působení na této katedře ovlivnilo řadu později významných myslitelů, mezi které patří například George Homans, Robert Merton, Harrison White a mnoho dalších. Přestože Parsonsova velká teorie neuspěla (v 60. a 70. letech 20. století byla vystavena velké kritice) a jeho katedra byla později zrušena, jeho vliv na systémové myšlení je stále živý ve vědě o komplexitě⁷.

Během 70. a 80. let 20. století se v matematice a přírodních vědách, zejména fyzice a biologii, začala vytvářet síť vědců, kteří se zabývali výzkumem dnes známým jako věda o komplexitě. V 90. letech se společnost začala opět měnit, tentokrát z industriální na postindustriální. S prudkým rozvojem počítačových technologií přišla revoluce v informatice, která změnila vše – od kultury, politiky až po vědu. S globalizací se vše najednou stalo komplexnějším a rychlejším. Stejně tak jako u přechodu ze společnosti tradiční na moderní sociologie tuto změnu opět reflektovala. V souvislosti s přechodem k postindustriální společnosti se odehrály změny i v sociologii samotné, a to v jejích epistemologických předpokladech, v tématech, která studuje, ve slovníku, který používá, v datech a metodách i v její institucionální organizaci. Na konci 90. let 20. století se tak vytvořila „... malá, ale rostoucí intelektuální komunita postavená na disciplinárním okraji západní společnosti“, kterou autoři nazývají zkráceně SACS – *Sociology and Complexity Science* [Castellani, Hafferty 2009: 25]. Vznik této komunity, stojící na okraji hlavního proudu sociologie, můžeme označit za obrat ke komplexnosti v sociálních vědách. Tato komunita byla zpočátku nejednotná a roztržštěná po západní Evropě a Severní Americe a její představitelé se zabývali různými oblastmi⁸. Spojovaly je však dva cíle, které se shodují s cíli Talcotta Parsonse – jednak se snažili propojit sociologii

7 Je ovšem třeba zmínit, že strukturální funkcionalismus a neofunkcionalismus mají určité styčné body s vědou o komplexitě, ale nejsou propojeny ve všech případech.

8 Centrem se později stal Santa Fe Institute v Novém Mexiku v USA (<http://www.santa-fe.edu/>).

s kybernetikou a systémovou vědou a jednak přemýšleli o komplexitě sociologie v systémových pojmech.

V roce 1998 byl založen specializovaný internetový časopis *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*.⁹ Články o multiagentním modelování nicméně vycházejí v mnoha různých časopisech¹⁰ a vychází také řada knižních publikací. Mnoho zajímavých informací lze nalézt na internetových stránkách významných pracovišť na celém světě¹¹, množství odkazů na publikované knihy a články o multiagentním modelování je umístěno například na stránce *Centre for Research in Social Simulation*.¹²

Základní pojmy

Ještě než přejdu k příkladu multiagentního modelu, je potřeba nejdříve vyjasnit základní pojmy, které jsou pro multiagentní modelování zásadní. Těmito pojmy jsou model, agent, prostředí a emergence.

Model

Každý multiagentní model obsahuje dva základní prvky – agenty a prostředí. „Multiagentní model sestává z množství softwarových objektů, ‚agentů‘, kteří interagují ve virtuálním prostředí.“ [Gilbert 2004: 4] Spuštěním modelu se začne vytvářet simulace, která spočívá v aktivování všech prvků modelu. Během simulace je na základě interakce prvků modelu generováno nějaké makrochování [Sawyer 2003: 326]. Model tedy představuje zjednodušenou reprezentaci nějakého sociálního fenoménu, ve kterém probíhající simulace zobrazuje sociální procesy [Gilbert 2008: 79].

Charakteristické znaky multiagentních modelů

Gilbert [2008: 14–16] za charakteristické rysy multiagentního modelu považuje jejich ontologickou podobnost, různorodost agentů, reprezentaci prostředí, interakci mezi agenty, omezenou racionalitu a učení. Ontologická podobnost znamená, že agenti v modelu přímo reprezentují skutečné lidi. Podobně i prostředí, ve kterém se simulace odehrává, většinou představuje skutečné prostředí¹³. Ontologická podobnost nám tedy umožňuje snadno a intuitivně model navrhnout a stejně tak jej poměrně snadno vyhodnotit. Na rozdíl od mainstreamové ekonomie, která předpokládá, že všichni aktéři

9 <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/>

10 Například Heath, Hill a Ciarallo [2009: 2.6] při analýze vzorku 279 publikovaných článků z let 1998–2008, které použili k analýze multiagentního modelování, uvádí, že tyto články byly uveřejněny v 92 různých publikacích.

11 http://en.wikipedia.org/wiki/Complex_systems#Research_centers.2C_conference-s.2C_and_journals

12 <http://cress.soc.surrey.ac.uk/web/home>

13 Většina modelů je používána na modelování fenoménů a situací v reálném světě, je ale možné vytvářet i modely, které reálné nejsou [Gilbert 2004: 5].

se chovají podobně (například v otázce racionálního rozhodování), v multi-agentním modelování může každý agent jednat na základě svých vlastních preferencí nebo pravidel chování. Modelování může simulovat interakci mezi agenty, která může probíhat buď přímo (pomocí komunikace), nebo nepřímo (např. interpretací jednání). V multiagentním modelování lze vytvořit agenty, kteří jsou omezení racionální, tedy ne vždy jsou schopni optimalizovat svůj užitek – chovají se tedy tak jako lidé ve skutečném světě. Učení v multiagentním modelu může probíhat jako individuální učení z vlastních zkušeností, evoluční učení, kdy po „úmrtí“ agenta vznikne nový a lepší agent, nebo jako sociální učení pomocí sdílení zkušenosti mezi agenty.

Typy modelů

Gilbert [2004: 5–8] popisuje určité typy modelů, které můžeme vytvářet. Multiagentní modely mohou být abstraktní, nebo deskriptivní – podle toho, do jaké míry se snaží zahrnout jednotlivé detaily. Mohou být umělé, nebo realistické – s ohledem na to, jak moc se snaží simulovat reálné sociální problémy. Dále mohou být modely normativní, nebo pozitivní. Normativní modely jsou navrženy tak, aby poskytly politické doporučení, jak určitou modelovanou problematiku vyřešit. Většina modelů je však pozitivní, sloužící spíše k popisu a pochopení dané problematiky. Modely také mohou být prostorové, nebo síťové – podle toho, jestli prostředí simulace reprezentuje nějaké fyzické prostředí, nebo vztahy mezi agenty. A nakonec modely mohou obsahovat agenty komplexní, nebo jednoduché.

Agent

Pojem agent v multiagentním modelování nemá stejné konotace jako agent v sociologické teorii [Sawyer 2003: 327]. Technicky jsou virtuální agenti „... počítačové programy, které imitují chování inteligentních bytostí ve fiktivním světě modelovaném na počítači pomocí virtuální reality“ [Brom et al. 2010: 1]. Podobně podle Gilberta [2008: 77] je agent „... počítačový program nebo součást programu, o kterém můžeme uvažovat jako o autonomně jednajícím a který reprezentuje jednotlivce, organizaci, stát nebo jiného sociálního aktéra“.

Základním rysem modelu je skutečnost, že agenti mezi sebou mohou interagovat neboli vzájemně na sebe působit. Znamená to, že si agenti mezi sebou mohou vyměňovat informace a na základě těchto informací jednat. Tato komunikace může představovat přímo mluvený dialog mezi lidmi. Výměna informací může probíhat také nepřímo, například prostřednictvím pozorování agentů, pomocí odhadu dopadů jednání jiných agentů [Gilbert 2008: 5–6] nebo pomocí tzv. stigmergie, kdy je komunikace zprostředkována pouze změnami v prostředí [Marsh, Onof 2008: 136].

Další důležitou charakteristikou agentů v multiagentním modelování je to, že jsou autonomní. Tato autonomie agentů znamená, že mají kontrolu nad svým chováním [Sawyer 2003: 327] a mohou jednat bez centrálního řízení z vnějšího prostředí [Burian 2007: 1]. Stejně tak jako ve skutečném světě se

virtuální prostředí, ve kterém se agent pohybuje, neustále mění. Protože agenti nemají kompletní znalost o prostředí, může se u nich stejné chování objevit vícekrát a může mít také různé výsledky. Protože agenti mají kontrolu nad svým chováním, mohou například odmítnout vykonat žádost jiného agenta nebo o ní mohou vyjednávat. Z toho vyplývá, že se v multiagentním modelování otevírá řada možností pro zkoumání otázek týkajících se kooperace a řádu [Sawyer 2003: 328]. Nicméně přestože jsou agenti autonomní (sami si vybírají, jaké jednání uskutečnit), jejich chování je omezeno tím, jak jsou předem naprogramováni (mohou volit pouze ze seznamu jednání, které předtím výzkumník vytvořil).¹⁴

Podle Sawyera [2003: 330] je komunita vědců zabývajících se multiagentním modelováním volně rozdělena podle toho, jestli se zaměřují spíše na tzv. kognitivní agenty, nebo tzv. reaktivní agenty. Kognitivní agenti mají určité znalosti o prostředí, mají určité cíle a jsou schopni rozhodovat se, jak jich dosáhnout. Tito agenti mohou mezi sebou komunikovat a jsou schopni vnímat, jaký má jejich chování vliv na prostředí. Reaktivní agenti jsou jednodušší, nemají znalosti o prostředí ani cíle a plány, pouze reagují na podněty z okolí [Schenk 2010: 26–27].

Prostředí

Prostředí v multiagentním modelování je jednoduše virtuální svět, ve kterém se agenti pohybují. Gilbert [2008: 78] definuje prostředí jako „... simulované okolí, ve kterém je umístěn agent zahrnující umělé fyzické prvky a další agenty“. Podle toho, jak je model vytvořen, může prostředí představovat jakési neutrální médium, které nemá žádný nebo jen malý vliv na agenty, nebo může být naopak vytvořené velmi pečlivě, tak jako agenti samotní. V tzv. prostorově explicitních (*spatially explicit*) modelech prostředí představuje geografický prostor (například město), existují ale i modely, které nepředstavují geografický prostor, ale nějaký jiný prvek (například sítě vztahů) [Gilbert 2008: 6].

Emergence

Multiagentní modely „... nemají žádnou centrální kontrolu, jsou to komplexní systémy, ve kterých nahromadění jednání autonomních agentů vede ke globálnímu chování systému“ [Sawyer 2003: 329]. Při vzniku globálního chování systému platí princip emergence, to znamená, že toto globální chování systému nemůže být predikováno nebo odvozeno z jednotlivých agentů a jejich chování.¹⁵ Emergence v multiagentním modelování tedy označuje proces, je-

14 Brom et al. [2010: 1–2] k ilustraci toho, jak jsou agenti na jednu stranu autonomní a na druhou stranu přísně vázáni na to, jak jsou naprogramováni, používá pěkné přirovnání agenta k špatnému úředníkovi. Takový úředník se bude zabývat problémem, který má vyřešit, tím způsobem, že si ve své knize předpisů nalistuje určité pravidlo a udělá přesně to, co mu pravidlo řekne.

15 Dobrým příkladem z říše přírody je například efektivně koordinovaný pohyb hejna ptáků nebo sociální organizace hmyzu, jako jsou mravenci nebo včely [Burian 2007: 6].

hož prostřednictvím je během simulace generováno nějaké makrochování, jinými slovy lze tedy emergenci popsat jako „... problém vztahu a přechodu mezi mikroúrovní a makroúrovní“ [Schenk 2011: 78].

Využití v sociologii

Možnosti využití multiagentního modelování jsou poměrně široké, pokrývají téměř všechny oblasti v současné sociologii založené na různých paradigmattech. Schenk [2011: 31–32] uvádí následující oblasti, ve kterých je tento přístup využíván:

- 1) základní procesy v sociálních systémech,
- 2) individuální a sociální strategie jednání,
- 3) dynamiku behaviorálních procesů, interakcí, postojů a názorů,
- 4) řízení a kontrolu,
- 5) vznik a dynamiku sítí a skupin,
- 6) dynamiku kultury a jazyka.

Do první oblasti základních procesů v sociálních systémech spadají například model studující roli reciprocity a sociální reputace ve vývoji vzájemných závazků ve společnostech založených na výměně darů [Younger 2004], model simulující vývoj altruismu v prostorově strukturovaných populacích [Németh, Takács 2007], model zkoumající vztah mezi potřebou kooperace a vznikem komunikace [Buzing, Eiben, Schut 2005] a analýzu sociálního učení prostřednictvím procesů sociální facilitace a imitace [Conte, Paolucci 2001]. Do skupiny individuální a sociální strategie jednání patří například model zkoumající utváření strategie odpouštění při opakovaném vězňově dilematu [O'Riordan 2000]. Dynamiku zkoumají například model týkající se dynamiky konverzace [Mastrangeli, Schmidt, Lucas 2010] nebo model zkoumající, kdy názorová dynamika skupiny vede ke konsensu, polarizaci nebo fragmentaci [Hegselmann, Krause 2002]. Dále do oblasti řízení a kontroly můžeme zařadit například modely zkoumající organizační kontrolu [Patrick, Dorman, Marsh 1999] nebo kritický management [Moss 1998]. Jako příklady oblasti vzniku a dynamiky sítí a skupin lze uvést model zkoumající sociální vztahy a emergenci sociálních sítí [Sutcliffe, Wang, Dunbar 2012] a model zkoumající vznik kooperace během meziskupinových konfliktů [Suleiman, Fischer 2000]. Nakonec oblast dynamiky kultury a jazyka zahrnuje například model zkoumající kulturní přenosy mezi a v rámci generací [Acerbi, Parisi 2006]. Tento výčet oblastí, ve kterých se multiagentní modelování používá, nezahrnuje všechny možnosti jeho aplikace. Podle Schenka [2011: 32] jsou dnes multiagentní modely aplikovány téměř na všechny oblasti, o které se současná sociologie zajímá.

Jednou z výhod multiagentních modelů je jejich integrační potenciál. Kromě zmíněných oblastí lze multiagentní modelování využít i v mnoha dalších oblastech, které mají interdisciplinární charakter. Jeden model se může opírat o různá (dokonce i soupeřící) teoretická paradigmatata [Schenk 2011: 32].

Dnes je v sociálních vědách většina multiagentních modelů založená na paradigmatu racionální volby nebo na nějakém druhu adaptivního chování, může však zahrnovat oba typy najednou [Axelrod 2005: 5–6].

Podle toho, na co se výzkum pomocí multiagentních modelů zaměřuje, lze podle Mathiasa [2010: 33–34] identifikovat čtyři kategorie aplikace multiagentních modelů. Zaprvé může sloužit k testování sociologické teorie. Přitom je třeba klást důraz na to, jak je teorie přenesená do modelu. Zadruhé může sloužit naopak k využití modelu k budování sociologické teorie nebo také k zdokonalování již existující teorie. Zatřetí lze model využít k prognostickým účelům, neboť dokáže simulovat různé varianty vývoje systému. Začtvrté může být multiagentní model použit k analýze a odhadu dopadů vnějších zásahů do sociálního systému.

Mikro- a makroúroveň

Podle některých autorů je multiagentní modelování metodologický nástroj vhodný k překlenutí individualistických a holistických přístupů v sociologii [Mathias 2010: 20]. Sawyer [2003: 354] ve svém článku ukazuje, jak může multiagentní modelování poskytnout nový pohled na diskuzi o mikro-makro přechodu v sociologické teorii pomocí tří mikro-makro spojení: emergence, sociální kauzality a dialektiky mezi emergencí a sociální kauzalitou. Ve svém článku pak ukazuje, jak může multiagentní modelování nabídnout novou perspektivu na nevyřešené dilema sociologické teorie. Konkrétně nám může pomoci odpovědět na otázku, jak mohou makrostruktury vznikat z individuálního jednání a naopak. Z jeho analýzy vyplývá, že existující modely jednoznačně nepodporují ani jedno krajní stanovisko, tedy jak metodologický individualismus, tak strukturální přístup. Vzhledem k tomu může být podle Sawyera na multiagentní modelování pohlíženo jako na „... hybridní sociologické teorie: teorie, které se pokoušejí usmířit individuální jednání, subjektivitu a interpretaci na jedné straně a strukturální a síťový přístup na straně druhé“.

Příklad aplikace: „Slumulace“

Na tomto místě bych pro ilustraci ráda ukázala konkrétní příklad aplikace multiagentního modelu v sociologii. Ještě před samotným příkladem krátce popíšu proces vytváření modelu.

Vytváření multiagentního modelu

Multiagentní modelování znamená počítačové modelování, ve kterém je vytvořen počítačový program s určitými vstupy a výstupy [Gilbert 2008: 2]. Samotné vytváření modelu probíhá pomocí specializovaných softwarových nástrojů [Burian 2007: 2]. Výzkumníci používají pro vytváření multiagentních modelů různé programy a žádný z nich není výrazně preferován.

V možnostech tohoto článku není popsát postup vytváření a analýzy multiagentního modelu, k tomu lze využít některou z publikací jiných autorů [např.

Gilbert a Troitzsch 2005; Gilbert 2008]. Pro zájemce o modelování v sociálních vědách Axelrod a Tesfatsion [2006] dokonce vytvořili on-line průvodce na vytváření multiagentních modelů pro začátečníky.¹⁶ Přesto považují za důležité nastínit základní obrysy toho, jakými stádii či fázemi je nutné při vytváření multiagentního modelu projít.

Abychom mohli multiagentní modely vytvářet, musíme mít vhodná data, na kterých můžeme analýzu založit. Vstupní data se pochopitelně liší podle toho, jaký typ modelu vytváříme (abstraktní/deskriptivní, umělý/realistický, pozitivní/normativní, prostorový/síťový, s komplexními/jednoduchými agenty) a k čemu má daný model sloužit (testování sociologické teorie, budování teorie, prognostickým účelům nebo analýze dopadů vnějších zásahů).

Podle Gilberta [2004: 8–11] je při vytváření modelu nutné si nejdříve ujasnit cíl práce, tedy položení základní výzkumné otázky. Tato výzkumná otázka by měla být dostatečně specifická a úzká, aby ji bylo možné zkoumat, ale zároveň by neměla ztratit zajímavé charakteristiky daného fenoménu. Je jednodušší vytvářet model, který je již předem podložený nějakou teorií. Častou a efektivní strategií je nejdříve vytvořit jednoduchý model, který je pak možné doplňovat o další podrobnosti. Samotný návrh simulace začíná definováním typů objektů, které mají být v simulaci obsaženy. To jsou především agenti, ale mohou to být také jiné objekty, jako je například potrava nebo překážky. Dále je nutné jednotlivým objektům přiřadit jejich vlastnosti. Dalším krokem je vymezení prostředí, ve kterém se budou objekty nacházet (to může být v sociologii v zásadě buď prostorové, nebo síťové). V dalším kroku je do modelu vnesena dynamika. To znamená definování toho, co se bude dít, až bude model spuštěn. Je potřeba vytvořit seznam jednání, které mají agenti a prostředí vykonávat. Stejně tak je potřeba stanovit, za jakých podmínek se má dané jednání uskutečnit. Posledním krokem je vytvoření uživatelského prostředí programu.

Podle Axelroda [2005: 6–10] by programování modelu mělo sledovat tři cíle: vnitřní validitu, použitelnost a rozšiřitelnost (*extendibility*). K naplnění vnitřní validity je potřeba správné přenesení modelu do programu. Pokud by byl model do programu přenesen špatně, jeho výsledek by odrážel chybu v programování a ne zkoumaný problém. Půžitelnost má umožnit komukoli spustit program, pochopit, jak pracuje, a interpretovat jeho výsledky. Požadavek rozšiřitelnosti má umožnit dalším uživatelům přizpůsobit program k novému využití.

„Slumulace“

Jako ilustrativní příklad jsem vybrala model Patela, Crookse a Koizumiho [2012] nazvaný „Slumulace“ (*Slumulation*), který zkoumá tři základní otázky: jak slumy vznikají, rostou nebo zanikají; kde a kdy ve městě vznikají a které procesy mohou zlepšit bytovou situaci městské chudiny.

16 Průvodce je dostupný na adrese: <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/abmread.htm>.

V současné době bydlí ve slumech téměř jedna třetina světové městské populace, zejména v rozvojových zemích Asie a Afriky. Prognózy říkají, že se v roce 2030 zvýší počet takto žijících lidí na dvě miliardy. Růst slumů je tedy důležitou společenskou otázkou pro rychle urbanizované rozvojové země, kterou se nadnárodní i lokální politika snaží vyřešit. Aby byla jejich opatření účinná, je zapotřebí porozumět třem výše zmíněným základním otázkám, které se model těchto autorů snaží zodpovědět pomocí simulace. Protože urbanizace a vznikání slumů jsou dynamické procesy, které se odehrávají ve městech, tedy komplexních systémech, multiagentní modelování poskytuje ideální rámec, pomocí kterého lze tuto problematiku zkoumat.

Samotný model „Slumulace“ autoři sestavili jako myšlenkový experiment, pomocí kterého se můžeme ptát na hypotetické otázky týkající se vytváření slumů.

Model obsahuje tři druhy agentů: domácnosti, developery a politiky. Ústředními agenty jsou domácnosti, jejichž nejdůležitějším atributem je výška příjmu. Podle příjmu jsou domácnosti rozděleny na tři skupiny: domácnosti s nízkým, středním a vysokým příjmem. Na základě příjmu si každá domácnost hledá cenově dostupné místo k bydlení. Pokud se nájem zvýší natolik, že si domácnost bydlení nemůže dovolit, zvažuje přestěhování na jiné místo v dalším časovém období, které je v simulaci chápáno jako jeden rok. Chudé domácnosti, které si nemohou dovolit vlastní místo k bydlení, mohou bydlet na jednu místě s jinou rodinou ze stejné příjmové skupiny. Pokud takovou rodinu nenajdou, musí se přestěhovat jinam (tzn. odstěhovat se mimo danou oblast). Do modelu je také vloženo, že domácnosti preferují bydlet vedle vysokopříjmové domácnosti, pokud si to mohou dovolit.

Developeri kupují prázdné pozemky a vytvářejí nové obytné jednotky za účelem vydělat. Na pozemku vytvářejí nemovitosti s větším počtem obytných jednotek, než kolik jich na daném místě bylo původně. Developeri jsou aktivními agenty od doby, kdy se objeví volný pozemek, do té doby, než jsou všechny vystavené obytné jednotky obsazeny. Tito agenti nejsou v modelu zastoupeni jako vizuální objekty, ale jsou začleněni do dynamiky modelu.

Politici v modelu sledují demografické složení svých volebních okrsků, které se skládají z několika domácností. Uměle snižují nájem obyvatelům slumů, aby od nich získali volební hlasy. Obyvatelé slumů žijící v okrscích s větším podílem slumů přitom platí menší nájem než ti, kteří žijí v okrscích s nižším podílem slumů. Výše nájmu pro obyvatele slumů se tedy liší podle procentuálního zastoupení slumů v daném okrsku (čím je počet obyvatel slumů v daném okrsku vyšší, tím důležitější jsou pro politiky jejich volební hlasy). Politici jsou aktivními agenty v celém průběhu modelu, nejsou vizuálně zastoupeni, ale jejich chování se odráží ve výpočtu nájmu.

Prostřední modelu je prostorové i neprostorové. Prostorové prostředí je složeno z pozemků neboli míst k bydlení (nejmenší prostorová jednotka modelu, na níž může bydlet jedna nebo více rodin) a volebních okrsků, které

Obrázek 1. Obrazový model města

rozděluje město na menší úseky. Neprostorové prostředí modelu zachycuje dynamiku spojenou s růstem města a změnami v příjmech a rozložení obyvatelstva.

Model byl vytvořen v rozhraní NetLogo 5.0, které umožňuje vizuálně zobrazit model jako město a domácnosti jako jednající agenty, které se mění v čase. Navíc umožňuje experimentování pomocí jednoduché změny vstupních parametrů modelu¹⁷. Model je k dalšímu experimentování volně dostupný na stránce <http://www.css.gmu.edu/Slums/>.

¹⁷ Uživatel může před spuštěním simulace zadat různé parametry, jako je původní velikost města, poměr nejlepších a nejhorších pozemků ve městě, populační růst, ekonomický růst, počáteční rozdělení příjmů a další.

Obrázek 2. Členění jednoho okrsku

Město je zobrazeno jako čtvercové prostředí, které je rozděleno na 51×51 čtverečků, představujících 2601 míst k bydlení (viz Obrázek 1). Dále je město rozděleno na devět okrsků, každý z nich má tedy 289 čtverečků neboli míst k bydlení, které může pojmout jednu nebo více domácností, které platí nájem za jeho využívání (pro jednoduchost nejsou jiné typy vlastnictví nemovitostí v modelu zohledněny).

Místa k bydlení (viz Obrázek 2) jsou rozlišena podle výše nájmu, v originále je toto rozlišení barevné: nejlepší místa s nejvyššími nájemnými jsou vybarvena světle žlutou barvou (zde světle šedé), horší místa k bydlení a nižší nájemné jsou zobrazeny tmavšími odstíny. Trojúhelníkové objekty představují jednotlivé domácnosti, jejichž barva představuje, do jaké příjmové skupiny patří: domácnosti s nízkými příjmy jsou červené, se středními příjmy jsou modré a s vysokými příjmy jsou zelené.

Přechodová pravidla pro agenty a různé prostorové entity modelu definují, jak se bude jednotlivá entita vyvíjet v průběhu simulace. Charakterizují také behaviorální pravidla domácností a jejich matematické vyjádření v modelu. Behaviorální pravidla definují, jak budou agenti reagovat na změny v prostředí. V modelu jsou přechodová a behaviorální pravidla pevně stanovená, ale parametrizace těchto pravidel jsou flexibilní a uživatel je může měnit.¹⁸ Autoři modelu dále detailně popisují, jak jsou definovány ceny bydlení, příjmy domácností, rezidenční mobilita, růst populace a ekonomický růst.

Po nastavení vstupních informací do modelu, kterými jsou mimo jiné počáteční velikost města a populační a ekonomický růst, se spustí simulace. Po uplynutí předem nastavených časových kroků, které reprezentují roky, se jako výsledek zobrazí konečná prostorová reprezentace města. Podle konečného rozdělení obytných míst na slumy¹⁹ a ne-slumy je ke studiu výsledku daného modelu spočítáno několik indikátorů: průměrná hustota slumů, počet slumů, procento populace bydlící ve slumech, procento plochy zastavené slumy. Tyto hodnoty jsou počítány jak průměrně pro město jako celek, tak i zvlášť pro centrum města a jeho okrajové části.

K verifikaci neboli testování vnitřní validity modelu autoři vložili do modelu údaje, které odpovídají typickým hodnotám pro rozvojové země²⁰. Tento verifikační model potvrdil vnitřní validitu modelu, protože jeho výsledkem byly podobné podmínky k bydlení, které můžeme pozorovat v některých městech rozvojových zemí. Další fází verifikace bylo studium vlivu různých vstupních zadání na výsledek modelu.

Po úspěšné verifikaci modelu autoři namodelovali čtyři simulační experimenty. V tomto článku popisují první experiment, kterým testovali, jak může populační růst ve městě ovlivnit vznik slumů.

Experiment byl spuštěn pro tři různé hodnoty populačního růstu – 2 %, 3 % a 4 %. Pro každou hodnotu populačního růstu byl model nastaven na časový interval 50 let a byl opakován stokrát. Jako konečný výsledek byly publikovány průměrné hodnoty jednotlivých modelů. Experiment ukázal, že rychlý populační růst (4%) vede k vysokému procentu slumů (27,9 %), zatímco pomalejší populační růst (2 %) vede k nižšímu procentu slumů (13 %). Jedním ze zajímavých výsledků tohoto experimentu je, že rychlý populační růst města má za následek vytváření slumů spíše na jeho okrajích než zhušťování osídlení původních slumů.

Tento příklad modelu „Slumulace“ ukazuje, jak může být multiagentní modelování užitečné ke zkoumání konkrétní společenské problematiky. Je

18 Například je v modelu pevně definováno to, jak ekonomický růst ovlivňuje cenu bydlení, ale uživatel může jednoduše měnit hodnotu ekonomického růstu a sledovat jeho vliv na vznik slumů.

19 Slum je v tomto modelu definován jako nedostatečný prostor k životu. V modelu to znamená, že na daném místě bydlí více domácností, než je počet jeho obytných jednotek.

20 Hodnoty byly zvoleny na základě dostupných empirických dat, případně na základě informovaného odhadu.

potřeba podotknout, že jde o první verzi modelu, kterou autoři zamýšlejí rozšířit. Jednak je jejich budoucím cílem modelovat nějakou skutečnou oblast (např. Mumbai v Indii) a jednak chtějí dále do modelu začlenit komplexnější chování a interakce, jako je soutěžení mezi developery nebo politickými stranami.

Výhody a limity multiagentního modelování

Hlavní výhodou multiagentního modelování je to, že na rozdíl od klasických modelovacích technik umožňuje vytvářet modely, ve kterých jsou jedinci a jejich interakce reprezentovány přímo [Gilbert 2008: 1]. „Jeden agent v modelu představuje jednoho aktéra; zpráva, kterou předává jeden agent jinému, představuje komunikaci; změna ve stavu agenta představuje změnu ve stavu aktéra a tak dále.“ Díky této přímé reprezentaci je multiagentní modelování intuitivní a poměrně snadno pochopitelné i pro laiky [Edmonds, Hales 2005: 211].

Určitou výhodou multiagentního modelování je to, že nutí výzkumníky jasně formulovat, co do něj vloží. „Na rozdíl od teorií a modelů, které jsou vyjádřené v přirozeném jazyce, počítačový program musí být specifikovaný naprosto přesně, aby mohl být spuštěn.“ [Gilbert 2008: 2] Aby byl multiagentní model užitečný, je tedy při jeho vytváření nutné precizně definovat jednotlivé předpoklady a všechny součásti modelu. Znamená to také, že model a všechny jeho detaily jsou přístupné dalším výzkumníkům k přezkoumání. Na druhou stranu to může být považováno za určitou nevýhodu, protože tato fáze není jednoduchá [Gilbert 2004: 1].

Na rozdíl od přírodních věd, například fyziky nebo chemie, kde je experiment považován za standardní vědeckou metodu, je v sociálních vědách provádění experimentů považováno za nemožné nebo nepřijatelné. V sociálních vědách se experimenty provádí jen velmi zřídka, neboť jsou eticky problematické. Právě zde leží velká výhoda multiagentního modelování, ve kterém lze provádět experimenty na umělých společnostech. Takový experiment probíhá pouze virtuálně v počítačovém prostředí, a odpadá tedy problém izolace nebo etických otázek [Gilbert 2008: 3].

Co se týče limitů multiagentního modelování, je potřeba si připustit, že některé sociologické otázky a problémy do modelu nelze vložit, protože jsou matematicky nebo výpočetně neřešitelné. V multiagentním modelování je zapotřebí dostatečného zjednodušení, a to jak agentů, tak modelu jako celku. Pokud bychom vytvořili simulaci, která by byla tak komplexní jako skutečný svět, analýza takového modelu by byla stejně složitá (a nemožná) jako analýza skutečného světa a nemohla by nám pomoci skutečný svět pochopit [Sawyer 2003: 353].

Mírně problematické se jeví také sdílení výsledků multiagentních modelů. Toto sdílení běžně probíhá buď v recenzovaných časopisech, nebo v knihách. Tento klasický způsob není pro sociální simulace zcela vhodný, protože rozsah článku o nějakém modelu bývá delší, než jsou možnosti těchto médií. Aby bylo možné model pochopit, je potřeba ho detailně popsat. Stejně tak popis vý-

sledků je poměrně obsáhlý. Protože jsou články o multiagentním modelování určeny pro mezioborové publikum a v sociálních vědách jde stále o poměrně nový přístup, každý článek musí obsahovat vysvětlení terminologie a také možnosti a limity tohoto přístupu. Axelrod proto navrhuje, aby byly vytvořeny nové způsoby publikace výsledků, které by kromě délky umožňovaly také připojit k článku dokumentaci²¹ [Axelrod 2005: 9–10]. Dnes už však tento problém mizí a sdílení výsledků se stává spíše výhodou, protože je již možné umístit model a jeho podrobný popis na internet, a to ve formátu, který umějí spustit běžné prohlížeče, takže čtenář může sám s modelem experimentovat.

Při použití multiagentního modelu jako nástroje pro testování teorie je podle Schenka [2011: 126] nezbytné pamatovat na to, že toto testování nemá empirickou povahu. Gilbert [2004: 4] také varuje před spojováním multiagentních simulací přímo se sociálními fenomény. Velmi důležité je tedy zvážit, do jaké míry můžeme daný model zobecnit. Simulace tak může být spíše chápána jako jakýsi prostředník „... mezi abstraktními představami o teoriích vyjádřenými v popisech v přirozeném jazyce a pozorováním fenoménu“ [Edmonds, Hales 2005: 230–231].

Multiagentní modely by měly být vždy, stejně jako experimenty, nezávisle opakovány, aby se potvrdila jejich platnost. Pokud model zůstane konzistentní s teorií při jeho nezávislém opakování různými lidmi a v různých programech, až poté můžeme tuto teorii považovat za platnou. Pokud se při těchto opakováních pokusech ukáže, že mezi modelem a teorií panuje určitý nesoulad, je na místě buď změnit model, nebo teorii. Zjistit, kde je chyba, však není lehké [Edmonds, Hales 2005: 211–212]. Při vytváření i interpretaci multiagentních modelů je tedy nutná značná opatrnost a důslednost.

Je třeba alespoň zmínit, že s využitím multiagentního modelování je spjata řada dalších metodologických problémů, o kterých se dlouhodobě diskutuje a které dosud nejsou překonány. Tyto problémy lze hierarchicky rozdělit do několika úrovní, které jsou vzájemně propojené: jde o úroveň filozofickou, všeobecně metodologickou (např. paradigmatické zakotvení v rámci sociálních věd), úroveň metodologických problémů středního stupně (např. problém strategie konstrukce multiagentních modelů a jejich vztah k sociologické teorii), úroveň speciálních metodologických problémů (např. problém validace a verifikace multiagentních modelů) a metodických problémů (např. možnost interpretace modelu) [Schenk 2011: 121–127].

Závěr

Cílem tohoto článku bylo ve stručnosti představit novou, zajímavou metodu v sociologii – multiagentní modelování. Nejdříve jsem se zabývala tím, jak se multiagentní modelování do sociologie dostalo a definovala jsem základní pojmy, s kterými se v této metodě pracuje. Dále jsem představila možnosti

21 Například časopis *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* k tomuto sdílení autory povzbuzuje, viz <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/admin/submit.html>.

využití multiagentního modelování v sociologii a představila jsem ilustrativní příklad konkrétního modelu. Na závěr jsem se zabývala také tím, jaké výhody tato metoda poskytuje a naopak na co je při použití této metody potřeba dávat pozor.

Podle Sawyera [2003: 326] multiagentní modelování „... dosáhlo takového stupně zralosti, ve kterém má potenciál být užitečným nástrojem pro sociology“. Multiagentní modelování může plnit různé funkce a tím přispět k rozvoji sociologie. Velkým příslibem této metody je také její interdisciplinární charakter [Mathias 2010: 35]. Zároveň je ale potřeba říci, že multiagentní modelování jako technika i jako paradigma je stále ve vývoji [Heath, Hill, Ciarallo 2009: 1.3]. Také podle Schenka [2011: 127] je multiagentní modelování tak zralé, že jej sociologové mohou použít, ale všechny metodologické problémy ještě zdaleka nejsou vyřešeny.

Axelrod [2005: 10–11] upozorňuje například na to, že je do budoucna potřeba zaměřit se nejen na vytváření nových modelů, ale zvláště na replikování modelů ostatních výzkumníků. Bez tohoto potvrzování modelů je možné, že jsou publikovány některé modely, které jsou špatně naprogramovány nebo nesprávně interpretovány. Nyní je tedy zapotřebí z vědců, kteří se simulacemi v sociálních vědách zabývají, vytvořit navzájem spolupracující interdisciplinární komunitu a pro další rozvoj jasně stanovit a zavést metodologii, standardizaci, výuku a vytvoření institucí.

ANNA KRČKOVÁ je studentkou magisterského stupně studia Sociologie na Fakultě sociálních věd Univerzity Karlovy v Praze. Zajímá se především o aplikovaný sociologický výzkum a jeho metodologii a nejrůznější metodologické inovace.

Literatura a zdroje

- Acerbi, A, D. Parisi. 2006. „Cultural Transmission Between and Within Generations.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 9 (1). [cit. 28. 6. 2013] Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/1/9.html>.
- Axelrod, R. 2005 „Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences.“ [online]. University of Michigan. [cit. 30. 1. 2013]. Dostupné z: <http://www-personal.umich.edu/~axe/research/AdvancingArtofSim.pdf>.
- Axelrod, R., L. Tesfatsion. 2006. „A Guide for Newcomers to Agent-Based Modeling in the Social Sciences.“ [online]. Iowa State University. [cit. 30. 1. 2013]. Dostupné z: <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/abmread.htm>.
- Brom, Cyril, M. Bída, M. Klíma, J. Gemrot, R. Píbil, T. Plch, R. Kadlec. 2010. „Virtuální agenti.“ Pp. 21–51 in V. Kvasnička a kol. (eds.). *Umelá inteligencia a kognitívna veda II*. Bratislava: STU.
- Burian, J. 2007. „Multiagentní modely sociálních organizací“ [online] in: P. Marků (ed.). *Kognice*. Olomouc: Univerzita Palackého. [cit. 30. 1. 2013]. Dostupné z: elizar.cz/honza/articles/burian_agents.doc.

- Buzing, P. C., A. E. Eiben, M. C. Schut. 2005. „Emerging communication and cooperation in evolving agent societies.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 8 (1). [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/1/2.html>.
- Castellani, B., F. W. Hafferty. 2009. *Sociology and Complexity Science: A New Field of Inquiry*. Berlin: Springer.
- Conte, R., M. Paolucci. 2001. „Intelligent Social Learning.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 4 (1). [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/1/3.html>.
- Edmonds, B., D. Hales. 2005. „Computational Simulation as Theoretical Experiment.“ *The Journal of Mathematical Sociology* 29 (3): 209-232. DOI: 10.1080/00222500590921283.
- Epstein, J. M. 2008. „Why Model?“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 11 (4) 12. [cit. 30. 1. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html>.
- Gilbert, N. 2004. „Agent-based social simulation: dealing with complexity.“ [online]. University of Surrey: Centre for Research on Social Simulation. [cit. 30. 1. 2013]. Dostupné z: <http://cress.soc.surrey.ac.uk/resources/ABSS%20-%20dealing%20with%20complexity-1-1.pdf>.
- Gilbert, N. 2008. *Agent-based models*. Los Angeles: Sage Publications.
- Gilbert, N., K. G. Troitzsch. 2005. *Simulation for the social scientist*. Maidenhead: Open University Press.
- Heath, B., R. Hill, F. Ciarallo. 2009. „A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008).“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 12 (4) 9. [cit. 30. 1. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>.
- Hegselmann, Rainer, Ulrich Krause. 2002. „Opinion dynamics and bounded confidence: models, analysis and simulation.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 5 (3). [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/3/2.html>.
- Marsh, Leslie, Christian Onof. 2008. „Stigmergic epistemology, stigmergic cognition.“ *Cognitive Systems Research*. (9) 1–2: 136 – 149.
- Mastrangeli, Massimo, Martin Schmidt, Lucas Lacasa. 2010. „The Roundtable: An Abstract Model of Conversation Dynamics.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 13 (4) 2. [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/4/2.html>.
- Mathias, Marek. 2010. „Možnosti využitia multiagentového modelovania v sociológii.“ *Sociálne a politické analýzy* 4 (1): 19–38.
- Moss, Scott. 1998. „Critical Incident Management: An Empirically Derived Computational Model.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 1 (4). [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/4/1.html>.
- Németh, András, Károly Takács. 2007. „The Evolution of Altruism in Spatially Structured Populations.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 10 (3–4). [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/10/3/4.html>.

- O'Riordan, Colm. 2000. „A forgiving strategy for the Iterated Prisoner's Dilemma.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 3 (4). [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/3/4/3.html>.
- Patel, Amit, Andrew Crooks, Naoru Koizumi. 2012. „Slumulation: An Agent-Based Modeling Approach to Slum Formations.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 15 (4) 2. [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/15/4/2.html>.
- Patrick, Steven, Patricia M. Dorman, Robert L. Marsh. 1999. „Simulating Correctional Disturbances: The Application of Organization Control Theory to Correctional Organizations via Computer Simulation.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 2 (1). [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/2/1/1.html>.
- Phillips, A. W. 1950. „Mechanical models in economic dynamics.“ *Economica* 17 (67): 283–305.
- Sawyer, Keith R. 2003. „Artificial Societies: Multiagent Systems and the Micro-Macro Link in Sociological Theory.“ *Sociological Methods & Research* 31 (3): 325–363. DOI: 10.1177/0049124102239079.
- Schenk, Juraj. 2011. *Metodologické problémy multiagentového modelovania v sociológii*. Bratislava: STIMUL.
- Suleiman, Ramzi, Ilan Fischer. 2000. „When One Decides for Many: The Effect of Delegation Methods on Cooperation in Simulated Inter-group Conflicts.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 3 (4). [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/3/4/1.html>.
- Sutcliffe, Alistair, Di Wang, Robin Dunbar. 2012. „Social Relationships and the Emergence of Social Networks.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 15 (4) 3. [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/15/4/3.html>.
- Younger, Stephen. 2004. „Reciprocity, Normative Reputation, and the Development of Mutual Obligation in Gift-Giving Societies.“ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online] 7 (1). [cit. 28. 6. 2013]. Dostupné z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/1/5.html>.

Příloha: Mapa vědy o komplexnosti

Zdroj: Castellani, Hafferty [2009: 244]. Poznámka: Aktualizovaná verze mapy je dostupná na blogu B. Castellaniho: <http://sacswebsite.blogspot.cz/2012/11/new-version-of-complexity-map.html>.