

Agentově orientované modelování revolučních procesů¹

Jaroslav Horáček² – Karel Černý³

Agent-Based Modeling of Revolutionary Processes. The objective of this work is to highlight recent advances in agent-based modeling of revolutionary processes, emphasizing the innovative methodologies of this emerging approach in social sciences. The revolutionary processes here are broadly defined as not only revolutions but rather as qualitative societal changes and related phenomena. Initially, we briefly clarify the fundamentals of agent-based modeling, including agents and environment, emergence, and generative mechanisms. We contrast these models with the more traditional equation-based methods prevalent in social sciences. We then detail Epstein's classical model of civil violence, which focuses on how central authorities mitigate decentralized rebellions. This is followed by Moro's model, which examines waves of civil violence against regimes. Subsequently, the model by Makowsky and Rubin is explored. It examines how centralizing authority and social network influence the phenomenon of preference falsification and its impact on institutional change. Lastly, Nowak and Lewenstein's use of cellular automata to analyze opinion polarization in populations is discussed. Each model is explained succinctly, requiring minimal mathematical background. We also highlight the emergent properties and critiques of these models. Moreover, we discuss the benefits and common criticisms of using agent-based modeling in social sciences.

Sociológia 2024, Vol. 56 (No. 3: 189-219)

<https://doi.org/10.31577/sociologia.2024.56.3.7>



Key words: *Computational models; agent-based modeling; revolution; social change*

Úvod

Pokud se zaměříme na publikace s tematikou agentově orientovaného modelování, počet článků týkajících se sociálních věd má v čase vzrůstající tendenci (Klein et al. 2018). V české a slovenské odborné literatuře se problematice agentově orientovaného modelování v sociálních vědách věnuje zatím jen relativně málo autorů. Na Slovensku se metodologickými problémy spojenými s touto oblastí intenzivně zabývá Schenk (Schenk 2011; 2017), dále například (Mathias 2016). V češtině můžeme najít úvody do problematiky (Kalvas 2016) nebo (Krčková 2013). O něco více je kvalifikačních prací věnujících se tomuto tématu, jak je možné zjistit pohledem do digitálních repozitářů závěrečných prací českých a slovenských vysokých škol. Co se týče problematiky modelování revolučních procesů, této oblasti se celosvětově věnuje jen několik zahraničních článků a aktuálně nevíme o žádném tuzemském. Přitom právě téma revolucí dostalo určitého oživení například v souvislosti s událostmi na

¹ Tato studie vznikla za podpory projektu Primus Arabská revoluce: Historicko – sociologická perspektiva a Grantové agentury Univerzity Karlovy (projekt č. 234322).

² Korespondence: RNDr. Mgr. Jaroslav Horáček, Ph.D., Katedra sociologie, Fakulta humanitních studií, Univerzita Karlova, Pátкова 2137/5, 182 00 Praha, Česká republika. E-mail: horacek@kam.mff.cuni.cz

³ Korespondence: Mgr. Karel Černý, Ph.D., Katedra sociologie, Fakulta humanitních studií, Univerzita Karlova, Pátкова 2137/5, 182 00 Praha, Česká republika. E-mail: : karel.cerny@fhs.cuni.cz

Blízkém východě souhrnně označovanými jako Arabské jaro. Jak uvidíme, řada představených modelů se bude této problematice dotýkat.

Jelikož se revoluce skládá z řady složek, procesů a událostí, které při analýze konkrétní historické reality může být těžké identifikovat (Černý 2016), budeme zde raději, místo o revoluci, hovořit o těchto složkách, a to jako o *revolučních procesech*. Myslíme jimi obecněji kolektivní kvalitativní proměny ve společnosti, které ale mohou vést ke změně, či provází změnu, společenského uspořádání.

V kontextu relativně uceleného tématu revolučních procesů chceme představit různé přístupy agentově orientovaného modelování této problematiky. Jelikož je to výzkumná oblast, kde se intenzivně prolínají sociální vědy s matematikou a informatikou, tato studie si klade za cíl přinést stručně, ale komplexně, přehled aktuálního stavu této badatelské oblasti způsobem srozumitelným pro sociální vědce.

Cílem je tedy i více přiblížit samotný obor počítačového agentového modelování. Toho lze názorně docílit tím, že představíme různorodou skupinu reprezentantů modelů, u kterých vysvětlíme, jak fungují, a to s minimálním množstvím matematického formálního pojmového aparátu, který tyto modely jinak využívají. Zároveň se nevyhneme ani kritice těchto modelů a obecněji chceme zvýraznit pozitiva i negativa agentově orientovaného modelování, zvláště takového, které využívá počítačových nástrojů.

Text má následující strukturu. V následující sekci blíže představíme agentově orientované modelování. Následně popíšeme způsob výběru modelů a představíme čtyři různé modely revolučních procesů a stručně modely na ně navazující. Kromě agentového modelování odkážeme i na dva alternativní výpočetní přístupy k této výzkumné problematice – teorii her a rovnicové přístupy. V posledních dvou sekcích shrneme, co vlastně agentově orientované modely (potažmo počítačové simulační modely obecně) nabízejí sociálním vědám, ale zachycujeme i nejčastější kritické námitky proti jejich používání.

Úvod do agentově orientovaného modelování

Je na místě alespoň zhruba uvést agentově orientované modelování. Z důvodu omezeného prostoru však není možné pustit se do detailního přehledu problematiky.

Tento metodologický přístup k budování modelů lze nalézt pod různými jmény. V české a slovenské literatuře se používá název multiagentní modelování, např. (Kalvas 2016; Schenk 2011) nebo agentově orientované modelování, např. (Husáková 2006). Někdy můžeme nalézt zmínku jen o agentových modelech, např. (Mathias 2016). Existuje ale i celá řada jiných méně častých variant označení, viz (Schenk 2011). V textu se budeme po dlouhém rozvažo-

vání držit varianty *agentově orientované modelování*, neboť je nejbližší anglickému názvu *agent-based modeling*. Také v určitém smyslu brání záměně s již zavedenou oblastí v informatice, a to multiagentními systémy. Tato oblast má poněkud jiné ohnisko zájmu spíše směrem k technickému řešení problémů, jak je popsáno například v (Netrvalová 2005). Pro úsporu místa, a abychom zabránili repetici, budeme někdy používat anglickou zkratku *ABM*.

Název agentově orientované modelování také dobře odpovídá určitému obratu, který nastal v oblasti sociálního modelování – tedy odklon od faktorů směrem k aktérům (angl. *from factors to actors*). Popsaný je například v (Macy – Willer 2002). Název tedy napovídá, že v centru pozornosti modelů stojí autonomní individuální jednotky tzv. *agenti*. Ty do určité míry reprezentují reálné aktéry, kteří nás v sociální realitě zajímají. Agenti jsou typicky virtuální, tedy jsou reprezentováni jako určitý počítačový program. Agenti mohou odpovídat individuálním aktérům v reálném světě, ale mohou reprezentovat i větší celky (např. skupiny, komunity, firmy apod.).

Virtuálně je často dáno také prostředí, ve kterém tito agenti interagují. To může být definováno různými způsoby. Může být spojitě (např. geografická mapa reálného světa) nebo diskrétní (např. dvourozměrná mřížka/šachovnice či síť uzlů a hran). Toto prostředí vhodným způsobem modeluje fyzický prostor, ve kterém se reální aktéři nacházejí. Modely zmíněné v tomto článku budou často využívat prostředí speciálního typu, a to *torus*.⁴

U těchto modelů je důležité zaměření na interakce agentů. K jejich interakcím dochází často lokálně v prostředí, tedy spolu interagují agenti, kteří k sobě mají ve virtuálním prostoru v určitém smyslu blízko (např. jsou umístěni v sousedících buňkách mřížky nebo jsou v síti propojeni hranami). Tato interakce agenta je vedena na základě určitého rozhodovacího mechanismu. Výhodou ABM je, že tento rozhodovací mechanismus agentů můžeme navrhnout či vyměnit dle potřeby. Například můžeme sestrojit agenta interagujícího na základě reaktivních pravidel ve tvaru podmínek *if-else*. Můžeme ho sestrojit jako z ekonomie známého optimalizujícího (omezeně) racionálního agenta. Je také možné vnitřek agenta vyplnit logickým odvozovacím mechanismem. Či můžeme pro rozhodování využít některých umělo-inteligenčních technik (evolučních algoritmů, neuronových sítí, Bayesovských sítí apod.). Lze sestrojit i hybridního agenta, který v sobě kombinuje více principů. Navíc agenti v populaci mohou být heterogenní, co se vnitřní skladby týče.

⁴ *Torus* (nebo mřížku ve tvaru toru) si můžeme představit následujícím způsobem. Kdybychom umístili agenta na políčko šachovnice a nechali ho postupovat po políčkách stále doprava, u klasické šachovnice by narazil na její okraj a dále by nemohl pokračovat. U této speciální šachovnice agent projde její hranicí a ocitne se na úplně nejlevějším políčku na stejném řádku. Analogicky by fungovalo procházení hranicí pro vertikální pohyb. Torus si tedy můžeme představit tak, jako bychom šachovnici napnuli na koblihu s otvorem uprostřed (tzv. *donut*). Toto prostředí, ač působí uměle, se používá proto, že každé políčko v něm má stejný počet sousedních políček.

Existuje řada kategorizací agentů, do kterých se zde ale nebudeme pouštět. Pro zájemce, klasifikaci z pohledu více sociálně vědního lze nalézt například v monografii (Schenk 2011). Klasifikaci z pohledu více inženýrského nalezneme v knize (Wooldridge 2009). Další odkazy na možné klasifikace agentů lze nalézt v článku (Mathias 2016).

Kombinace agentů, prostředí a definovaných interakcí specifikuje model. Dva nejčastější způsoby vytváření modelů odpovídají principům KISS a KIDS, což znamená v angličtině *Keep it simple, stupid* a *Keep it descriptive, stupid*, viz například (Schenk 2011). V přístupu KISS nám jde o co nejjednodušší idealizaci, nikoli však přílišnou simplifikaci, reálného systému, která slouží k hlubšímu pochopení fungování základních procesů systému. Zároveň toto zjednodušení slouží ke snazší interpretaci a komunikaci výsledků plynoucích z modelu. V případě KIDS nám jde naopak o to, zahrnout do modelu všechny důležité detaily a faktory. Cílem je zajistit, že model přesně odpovídá reálnému systému, který má popisovat. Zároveň ale je tento popis limitován výpočetní realizovatelností modelu.

S agentově orientovanými modely se typicky pracuje pomocí simulace. Simulace začíná v počátečním stavu (v čase $t=0$), který je charakterizovaný například počátečním nastavením prostředí, počátečním rozmístěním agentů v tomto prostředí, či počátečními hodnotami vnitřních parametrů agentů. Dále simulace po spuštění pokračuje tím, že se v prostředí nechají jednotliví agenti spolu interagovat v čase. Čas v simulaci může být také spojitý nebo diskrétní⁵. Zde v textu bude používán diskrétní čas, který ubíhá po stejně velkých bezrozměrných krocích. V těchto krocích se dějí události, například vnímání prostředí nebo interakce agentů. O přesné rozvržení těchto událostí se stará plánovač, angl. *scheduler* (Wilenski – Rand 2015), určující mimo jiné i to, kteří agenti v daném časovém okamžiku spolu budou interagovat. Jelikož typicky v počátečním nastavování a následných interakcích simulace hraje roli generování náhodných čísel, simulace se opakuje několikrát pro stejné nastavení parametrů, aby bylo možné dosáhnout statisticky robustních výsledků. Pomocí náhody se v modelech řeší například nedostatek informací o interakcích mezi jedinci či počátečním rozložení hodnot parametrů v populaci.

Lze tušit, že pro různá interakční pravidla a různá počáteční nastavení simulace se může celý systém modelu různě vyvíjet. Za určitých podmínek mohou krystalizovat stavy, ve kterých se vývoj ustálí (*ekvilibria*) nebo se v modelu mohou objevit specifické vzory či pozorovatelné proměny těchto vzorů. Simulace nám kromě počátečních nastavení vedoucích k těmto stavům ukazují i trajektorii systému, tedy ukazují nejen konečný stav, ale i dynamický proces,

⁵ Vzhledem k tomu, jak počítač umožňuje reprezentovat reálná čísla, je reprezentovaný čas technicky vzato vždy diskrétní, jelikož počítač umožňuje reprezentovat jen konečně mnoho čísel. Spojitostí času se zde rozumí spíše nestejnost délky časových rozestupů mezi událostmi či interakcemi.

který k dosažení daného cílového stavu vedl. Celý pohled se blíží fyzikálnímu pohledu na (virtuální) sociální systém – je vnímán jako dynamický systém. Dobře je tento přístup ilustrovaný v knize Bouldinga (Boulding 1963). Během simulace pozorujeme dynamiku modelu v čase, např. dosažení ekvilibria systému, emergence nových jevů, samoorganizační procesy či naopak nárůst chaosu.

Zejména v modelování jde o případy *emergence* těchto jevů, tedy o vznik neočekávané kvalitativní změny či konstelace v systému, kterou nelze jednoduše vysvětlit z počátečního nastavení systému a interakčních pravidel agentů. O povaze této emergence v ABM se stále vedou rozsáhlé diskuze (Schenk 2011). Pro nás zde bude stačit, že tyto jevy, které vznikají na vyšší úrovni, než je úroveň jednotlivých agentů, budeme označovat jako emergentní.

S pojmem emergence úzce souvisí pojem *generativních mechanismů*, jelikož cílem budování agentově orientovaných modelů je právě identifikovat mechanismy, které vedou k emergenci. Tyto mechanismy ovlivňují, jak agenti v prostředí vnímají, rozhodují se a interagují. Generativní mechanismy tak, jinými slovy, tuto emergenci vygenerují. Diskutovaným základem generativních společenských věd je předpoklad, že pokud nedokážeme daný jev pomocí těchto mechanismů vygenerovat, ani zdaleka jsme nevysvětlili, jak se daný jev v systému objeví (angl. *If you did not grow it, you did not explain its emergence.*) (Epstein 1999).

Ač se to na první pohled nemusí zdát, agentově orientované modelování má ke společenským vědám blízko. Právě zaměření na explanaci mechanismů, společně se zaměřením na strukturní individualismus, vytváří přirozený průnik mezi agentově orientovaným modelováním a analytickou sociologií. O vztahu explanačních multiagentních modelů a analytické sociologie je možné se více dočíst v monografii (Schenk 2017). Dokonce i v úvahách o nadcházejících teoriích revolucí tzv. čtvrté generace, se objevují zaměření na témata, které předchozí generace přehlížela (do té patří například Skocpol či Tilly). Jedním z obnovených témat je právě důraz na akce jednotlivých aktérů (*agency*) (Foran 1993).

Pro ilustraci odlišnosti tohoto přístupu je vhodné porovnat ABM s přístupem, který je v sociologii zavedenější a častější, a to rovnicově orientovaným přístupem (angl. *equation-based modeling*, zkráceně EBM). Tento přístup, jak název napovídá, je založený na popisu vztahů veličin pomocí matematických rovnic (např. rovnice regresního modelu, diferenciální rovnice). Ilustrovat rozdíl mezi ABM a EBM můžeme na klasickém modelu vývoje populace skládající se z dravců a kořistí, známý pod označením autorů Lotka-Volterra (Lotka 1910). Takovýto model říká, jak se bude v čase vyvíjet počet jedinců dravců a jedinců kořisti v populaci. Závisí na několika parametrech, například, jak rychle se jednotliví jedinci množí, či jak rychle dravci loví kořist. To, co ale

model popisuje, je časový vývoj agregovaných proměnných – počtu jedinců typu kořist a počtu jedinců typu predátor v čase. Agentově orientovaný model by se oproti tomu soustředil na konkrétní interakce konkrétních jedinců. Získat informace o počtu jednotlivých typů jedinců v každém časovém momentu bychom dokázali také, tím, že je jednoduše sečteme. Pokud je to pro nás užitečné, zde ale navíc můžeme nahlédnout, jak si vede zvolený konkrétní jedinec. Neříkáme zde, že jeden typ modelování je horší a jiný lepší. Každý má své použití. V určitém smyslu jsou na sebe tyto přístupy teoreticky převoditelné, avšak v praxi se to příliš nedělá. Někdy totiž není nutné v modelu jít až na úroveň individuálních interakcí a vystačíme si s rovnicovými přístupy. Na druhou stranu popsat jednotlivé interakce jedinců rovnicově vyžaduje často neúměrně dlouhý a komplexní zápis, zvláště pokud agenti projevují známky paměti či nelineárního chování (Bonabeau 2002). Agentově orientovaná alternativa Lotka-Voltera modelu je k nalezení například ve (Willenski – Rand 2015). Pro více informací o srovnání obou přístupů je možno nahlédnout do případové studie (Van Dyke et al. 1998).

Odlišný je také způsob práce s agentovými a rovnicovými modely. Pro rovnicové modely jsme často schopni dopředu vypočítat řešení (například dokážeme pro zadaná data vypočítat tvar regresní křivky). Máme tedy v jistém smyslu dopředu řešení, či predikci, jak se bude model v čase vyvíjet. Pro agentový model typicky musíme spustit simulaci a sledovat ji⁶. Vzhledem k tomu, že agentové modely typicky závisí na množství náhodných proměnných, těžko můžeme po doběhnutí simulace hovořit o řešení modelu. Axtell navrhuje, že je mnohem užitečnější mluvit o ohledávání modelu (*exploring*) než o řešení. Poctivého ohledávání docílíme, jen když budeme s modelem experimentovat na základě měnících se vstupních parametrů (Axtell 2000). Podobně jako biologové zkoumají kultury v Petriho misce, i sociologové zde při zkoumání modelu mohou provádět řadu experimentů, ale ve virtuální sociologické laboratoři.

Z důvodu omezeného prostoru není možné jednotlivá témata více adresovat. Zájemce o techničtější a implementační stránku ABM můžeme odkázat na monografii (Willenski – Rand 2015) či (Gilbert 2019). Metodologické otázky ABM jsou naopak shrnuty v komplexním přehledu (Schenk 2011). Vztah ABM a budování sociálně-vědní teorie je více vysvětlen v (Schenk 2020).

Ačkoli může výše zmíněný přístup působit nově a fantaskně, tak podobné přístupy k modelování existují již desítky let, i když nepoužívaly nutně počítačových nástrojů, nebo se explicitně nezmiňují o agentech. Jako známý příklad obdobného přístupu lze uvést klasický Schellingův model segregace (Schelling 1969). Jím navržený model lze po krocích simulovat ručně, například tak, že si

⁶ I když dodejme, že existují i simulační přístupy k řešení rovnicových modelů, například při řešení diferenciálních rovnic pomocí Monte Carlo simulací.

konstelace v jednotlivých krocích kreslíme na papír, či znázorňujeme figurkami na šachovnici. Pokud však chceme něco podobného provést pro větší počet entit, nezbyde nám než využít výpočetní síly, kterou nabízí počítače. Například v článku (Nowak – Lewenstein 1996) simulovali najednou populaci o 250 tisíc jedincích. V následujících sekcích si proto představíme několik počítačových modelů revolučních procesů.

Modely revolučních procesů

Dle našeho vědomí je jedinou prací, která se přehledově věnuje problematice agentově orientovaného modelování revolučních procesů, Lemosův článek (Lemos et al. 2013). Jeho pole působnosti je širší, zahrnuje totiž i jevy jako výtržnosti, násilí, pouliční bouře. Nám zde především jde nikoli o manifestace revolučních procesů, ale především o modely procesů kvalitativní změny ve společnosti. Některé takové modely revolučních procesů v Lemosově článku naopak chybí. Nicméně, jako počáteční rozcestník pro hledání relevantních modelů nám může tento článek dobře posloužit.

Další relevantní práce jsme hledali pomocí vyhledávače Google Scholar, kde jsme ve vyhledávání požadovali články s titulkem obsahujícím slovo „agent-based“ doplněné slovem „revolution“, „social change“ nebo „violence“. Další práce vhodné k začlenění jsme získali metodou sněhové koule ze seznamu referencí na konci těchto publikací. Přesto si neklademe za cíl poskytnout úplný přehled této literatury. Spíše se zaměřujeme na to, abychom obsáhli vhodné reprezentanty tohoto směru, kteří představují aktuální stav oboru a styl uvažování typický pro agentově orientované modelování. Abychom ale nastínil i jiné přístupy k modelování revolučních procesů představíme krátce i přístupy využívající jiných technik.

Jako první model představíme *Epsteinův model občanského násilí* (Epstein 2002), který je snad nejznámějším zástupcem modelování revoluční problematiky. Dalo by se říci, že tento článek odstartoval modelování revolučních procesů. Pro demonstrování, jak lze *Epsteinův model* doplnit, navážeme modelem dynamiky násilných politických revolucí v (Moro 2016). Ten rozšiřuje *Epsteinův model* o širší sadu aktérů a také jednodušší operacionalizaci některých parametrů. Jinou variantou je model z práce (Makowsky – Rubin 2013), který také využívá jiné typy aktérů, ale navíc uvažuje určitým způsobem okolí aktérů. Jako poslední si představíme *Nowakův přístup* (Nowak – Lewenstein 1996) pomocí tzv. celulárních automatů, které ale lze určitým způsobem vnímat jako podtřídu ABM.

Existují i další agentově orientované modely procesů, které s tématem revolucí více či méně souvisí – guerilová válka, nepokoje, sociální násilí apod. Některé takové další modely lze nalézt v přehledovém článku (Lemos et al. 2013). Masovým konfliktem se zabývá například model (Situngkir 2004) vycházející

také z *Epsteinova modelu*. Model emergence nových politických aktérů nalezneme v (Axelrod 1994). Několik dalších rozšíření *Epsteinova modelu* je navrženo v knižně vydané dizertační práci (Lemos 2018).

Epsteinův model občanského násilí

Jednou z hojně citovaných prací věnovaných modelování revolucí je Epsteinův článek (Epstein 2002). V něm představuje dva jednoduché modely, které jsou založené na ABM. První ze dvou zmíněných *Epsteinových modelů* zachycuje situaci, kdy se centrální autorita snaží potlačit decentralizovanou rebelii (nebo můžeme velmi opatrně říci revoluci). V druhém modelu Epstein popisuje situaci, kdy se centrální autorita snaží potlačit násilí mezi dvěma válčícími etnickými skupinami. V obou modelech Epsteina spíše než konkrétní nastavení a sledování parametrů zajímá vnitřní dynamika simulovaných procesů.

Zde popíšeme pouze první model, jelikož je relevantní pro tento text. V tomto modelu se vyskytují dva typy aktérů: *občané* (Epstein je nazývá prostě *agents*), kteří ne/projevují svou nespokojenost a *policisté (cops)*, kteří případným projevům nespokojenosti zabráňují. Nejprve popíšeme chování občana, které je o něco komplikovanější. Model vychází z toho, že se občan odhodlá k akci manifestující svou nespokojenost, jestliže prožívá určitou míru pocíťované křivdy vyjádřené proměnnou **G** (*grievance*). Celková proměnná křivdy se skládá ze dvou komponent, **H** – občanem vnímaná těžkost života (*hardship*) a **L** – občanem vnímaná legitimita režimu (*legitimacy*). Vychází se z předpokladu, že samotná těžkost života ještě nemusí vést k revoluci. Hodnota **H** je nezávisle přiřazena každému občanovi na počátku simulace, a to náhodně z rovnoměrného rozdělení $U(0, 1)$. V tomto modelu je **L** definována externě pro všechny občany a pochází z intervalu $[0, 1]$. Může se v čase i měnit. Celková míra křivdy se nakonec spočítá jako

$$G = H \times (1 - L).$$

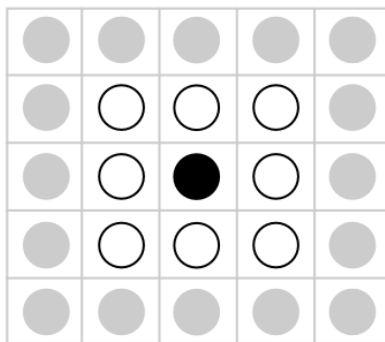
Podle této teorie se těžkost života projeví na pocíťované křivdě tím méně, čím je vyšší legitimita systému (tedy čím bližší je hodnotě 1). Vzorec připomíná teorii budovanou v (Gurr 1968), přestože se na ni Epstein explicitně neodkazuje. Gurr pokládá za základ občanského násilí relativní deprivaci, přičemž graficky znázorňuje komplexnější vliv různých faktorů na kolektivní odpověď na nespokojenost formou násilí. Nicméně frustrace zde hraje silnou roli zároveň s její legitimitou. Gurr také formuluje pravidlo, že síla hněvu je inverzně proporční k míře legitimacy deprivace.

Každý občan se nachází v jednom ze dvou stavů, buď je pasivní (skrývá se, nechává si svou nespokojenost pro sebe), nebo je aktivní (veřejně vystupuje, demonstruje apod.). Každý občan má různou toleranci k riskování **R** (*risk*

aversion), která je na začátku simulace také každému občanovi nezávisle vygenerována z rovnoměrného rozdělení $U(0, 1)$.

Prostředí modelu má podobu po okrajích založené dvourozměrné mřížky, tzv. toru, kterou jsme představili v úvodní sekci k ABM. Na každém políčku mřížky se může v každém kroku vyskytovat pouze jeden agent. Občané i policisté se mohou po mřížce pohybovat. Pravidlo pro pohyb je jednoduché: *Podívej se na své viditelné okolí a do náhodného prázdného políčka se přesuň*. Každý občan totiž vnímá určité okolí sousedních buněk, které vidí a které jsou pro něj dosažitelné. Používá se takzvané Moorovo okolí, které je znázorněné na Obrázku č. 1. Různé jiné používané typy okolí můžeme najít například v (Schenk 2011).

Obrázek č. 1: **Moorovo okolí**. Mřížka je rozdělena na buňky, v každé buňce je umístěn jeden agent znázorněný barevným kolečkem. Námi vybraný agent má černou barvu. Agenti s bílou barvou náleží do jeho Moorova okolí s poloměrem $r = 1$, agenti s bílou a šedou barvou náleží do Moorova okolí s poloměrem $r = 2$.



Zdroj: Vlastní zpracování.

Pravděpodobnost P , že aktivního občana na tomto okolí zatkne policista, je závislá na poměru policistů ku počtu aktivních občanů na tomto prostoru. Logicky, při velkém množství policistů a malém množství občanů je pravděpodobnost vysoká. Tato pravděpodobnost je naopak nízká při malém množství policistů a velkém množství aktivních občanů. Epstein zavádí pomocnou veličinu $N = R \times P$ a uvádí jednoduché pravidlo pro aktivaci agenta:

Pokud $G - N > T$, agent je aktivní, jinak je pasivní.

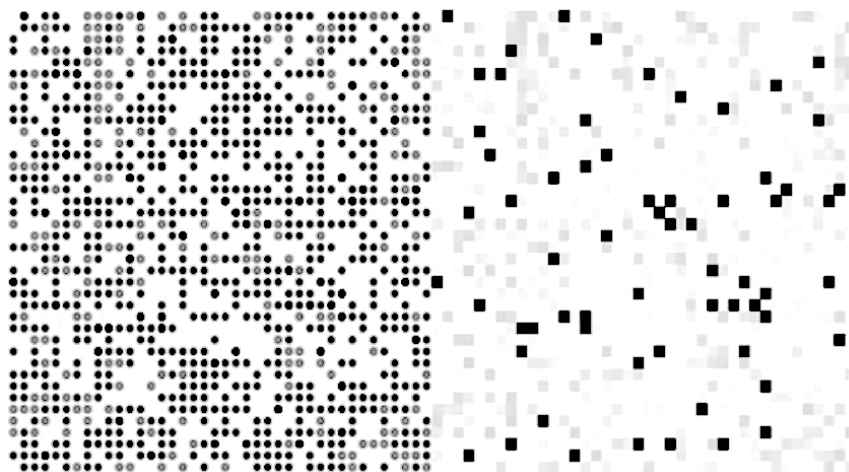
Parametr **T** udává aktivační práh pro každého občana. Přístup pomocí prahování zde odpovídá známému přístupu, který popisuje Granovetter v (Granovetter 1978).

Každý policista má také své viditelné okolí, které může být teoreticky jiné než okolí občana, ale v *Epsteinově modelu* je stejně velké. Policisté operují na základě jednoduchého pravidla. V každém kroku simulace vybere policista ze svého okolí náhodně jednoho aktivního občana (pokud se zde vyskytuje) a toho zatkne na předem náhodně zvolenou dobu. Po této době se občan vrací zpět do mřížky. Předpokládá se, že se občan z vězení vrací stejně frustrovaný i aktivní, jak do něj přišel.

Nyní zbývá definovat, jakým způsobem probíhá jeden krok simulace. V každém kroku se v náhodném pořadí vyberou postupně všichni agenti a každý se posune podle pohybového pravidla. Zároveň s pohybem, pokud je agent policista, tak se provede pravidlo pro zatýkání, pokud je agent občan, provede se pravidlo pro aktivaci.

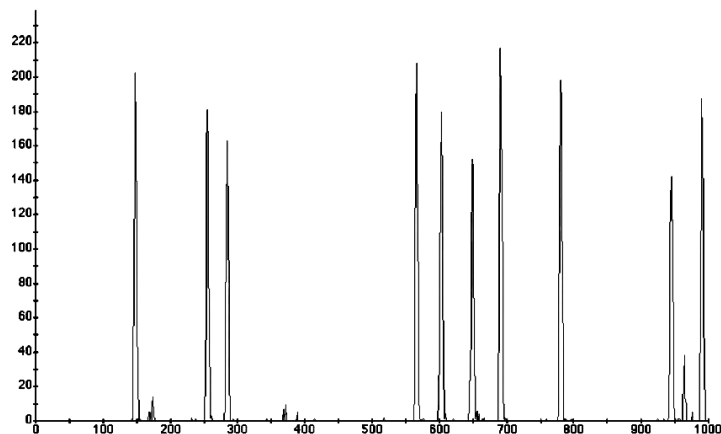
Popsaný model v simulačních bžích vykazuje následující emergentní vlastnosti: 1) U aktivních agentů dochází autonomně k vypínání aktivity v přítomnosti policistů. Zdánlivý klid a stabilita na povrchu ale nekorespondují s negativním vnitřním naladěním. Aktivita a frustrace spolu tedy nutně nemusí korespondovat. 2) Model proto vykazuje takzvaná *přerušovaná ekvilibria* (angl. *punctuated equilibrium*). Dlouhá období klidu jsou narušována výbuchy aktivity, jakmile se naakumuluje dost aktivních občanů v okolí s málem policistů. Doby spontánních prodlev mezi masivnějšími výbuchy připomínají log-normální rozdělení. Podobně tuto fázi popisuje například Krejčí (Krejčí 1968), který tuto fázi revolučního procesu nazývá *stlak* a *revoluční výbuch*. Situace opětovného výbuchu se může opakovat ve fázi, kterou nazývá *konsolidační převrat*, kdy se rozpadá kontrarevoluční koalice a revoluční složky se opět sbližují.

Obrázek č. 2: **Ilustrace lokálních nepokojů.** *Levá část obrázku ukazuje rozmístění občanů a policistů (tmavší kolečka), aktivní občané jsou znázorněni světlejšími kolečky. Pravá část obrázku ukazuje rozmístění policistů (černé čtverečky) a míru frustrace občanů (čím tmavější odstín šedé, tím vyšší frustrace). Ve znázornění vidíme několik lokálních ohnisek nepokojů.*



Zdroj: Převzato a upraveno z (Epstein 2002).

Obrázek č. 3: **Přerušované ekvilibrium.** *Dlouhé chvíle klidu jsou přerušené náhlým rapidním nárůstem počtu aktivních občanů. Délky časových intervalů mezi výbuchy jsou náhodné a jejich distribuce připomíná log-normální rozdělení. Vodorovná osa reprezentuje kroky simulací, na svislé ose je reprezentován počet aktivních občanů.*



Zdroj: Převzato a upraveno z (Epstein 2002).

Vznik lokálních ohnisek *Epsteinova modelu* je ilustrován na Obrázek č. 2 a prodlevy mezi výbuchy aktivity jsou ilustrovány na Obrázku č. 3. 3) Pokud se legitimita systému snižuje postupně po drobných krocích, lze ji snižovat mnohem déle, aniž by se výbuch aktivity dostavil. Policie totiž drobné zárodky potenciálních ohnisek aktivity stihne eliminovat. 4) Oproti tomu prudké skokové snížení legitimacy již vlnu aktivací zažehne. S tím může souviset citlivost občanů na silné události, například tragického rázu, které skokově sníží legitimitu systému. Jako příklad takové tragické události, která zažehla jiskru protestů, můžeme zmínit například sebeupálení tuniského zelináře Muhammada Buazíziho, jak je popsáno v (Mendel 2015). Epstein zdůrazňuje, že dle modelu je pro revolucionáře výhodnější posečkat a zažehnout aktivitu v jednom silném momentu než opakovaně přživovat revoluční energii a snižovat legitimitu systému napříč delším obdobím. Na straně režimu naopak hrají roli agenti provokatéři, kteří mohou způsobit náhlé lokální zažehnutí aktivity a její rychlé zchlazení pomocí vychytání nejaktivnějších občanů policisty, čímž se zabrání rozšíření revoluční jiskry v masovou aktivaci. 5) Snižování počtu represivních složek (tak Epstein interpretuje v modelu liberalizaci režimu) také způsobí zažehnutí vlny aktivity, jen s poněkud odlišnou dynamikou. Určitá liberalizace režimu skutečně někdy také předcházela revolučním výbuchům (př. Íránská revoluce), viz například (Kuran 1995).

Přes zajímavost výsledků *Epsteinova modelu* bychom k němu mohli mít celou řadu výtek. Lemos (Lemos et al. 2013) například zmiňuje nereálnost pohybu agentů v prostředí, příliš hrubé modelování interakce mezi občany a policisty, obtížnou provázanost mezi parametry modelu a reálnými sociálními indikátory, či absenci vlivu kolektivní paměti na předcházející události. Také se nám nemusí líbit inicializace parametrů jako je těžkost života nebo tolerance k riskování pomocí uniformního rozdělení. Rozdělení může být spíše normální, jak u podobné veličiny naznačuje Gurr (Gurr 1968). Problém může být i s měřením těžkosti života. U měření hodnoty **H** záleží, zda se jedná o osobní hodnotu každého agenta nebo o míru těžkosti kolektivní. Ve druhém případě je možné tuto hodnotu operacionalizovat mezinárodně sbíranými socio-ekonomickými indexy (např. EHI – Economic Hardship Index). Avšak tato hodnota může být pro některé účely zavádějící, jelikož nemusí vypovídat o individuálních životních těžkostech. Jako další výtku dodejme, že model prostředí znemožňuje dobře definovat, co je jádro prostoru a co periferie, kde se probíhající revoluční procesy mohou lišit.

Na Epsteinově hojně citovaném modelu nicméně staví celá řada dalších autorů snažících se napravit tyto nedostatky. Některé z nich si představíme v dalších sekcích. Pro vyzkoušení *Epsteinova modelu* – jak se s tímto modelem pracuje a jak je s ním možné experimentovat – je k dispozici jeho volně

dostupná implementace v online verzi softwaru NetLogo (Tisue – Wilensky 2004)⁷.

Morův model dynamiky násilných politických revolucí

Jedním z modelů, který navazuje na Epsteinovu, je Morův model dynamiky násilných politických revolucí popsáný v (Moro 2016). Model využívá též přístupu ABM, ale oproti Epsteinovi obsahuje tři typy agentů – utlačovanou populaci, členy revoluční organizace snažící se násilně svrhnout režim a loajální policii režimu.

Dalším důležitým rozdílem oproti Epsteinovi je, že míru těžkosti života **H** počítá z příjmu každého obyvatele **Y**. Ten se každému občanovi náhodně přidělí na počátku simulace dle log-normálního rozdělení. Touto operacionalizací se odráží určitým způsobem ekonomická situace jedince, která je snáze empiricky měřitelná než složky v *Epsteinově modelu*. Parametr **H** se spočítá jako

$$H = \frac{\exp(E(Y) - Y)}{1 + \exp(E(Y) - Y)}$$

Tím získáme, klesající funkci v závislosti na příjmu s výslednou hodnotou v intervalu (0, 1). Výraz $E(Y)$ značí střední hodnotu všech příjmů občanů. V teorii revolucí ekonomickou situaci jako faktor mající vliv na spuštění revolučních procesů uvažuje například Brinton (Brinton 1965) nebo Davies (Davies 1962).

Stejně jako v *Epsteinově modelu* zde agenti vnímají své viditelné okolí. Opět se pohybujeme na dvourozměrné čtvercové mřížce ve tvaru toru, a opět jsou aktivní občané zatýkáni na dobu náhodně přidělenou z rovnoměrného rozdělení $U(0, j_{max})$, kde j_{max} je maximální možná doba zatčení.

K vyhodnocení pravidla pro aktivaci občana zavádí Moro pomocnou veličinu **N**, kterou počítá jako

$$N = A \times J,$$

kde **A** je pravděpodobnost, že aktivní agent bude zatčen a **J** je funkce vyjadřující cenu, kterou musí občan potenciálně zaplatit za aktivní účast v revoluci. Přesný vzoreček zde nepopisujeme, nicméně se jedná o funkci závisle-

⁷ Online verze NetLogo je dostupná na adrese www.netlogoweb.org. Běží ve webovém prohlížeči a není tudíž potřeba žádná instalace. *Epsteinův model občanského násilí* je možno nalézt v knihovně modelů pod záložkou Sample models/Social science/Rebellion (kontrolováno 30. 4. 2024). Mezi dostupnými modely lze nalézt i *Schellingův model segregace* a agentovou verzi *Lotka-Volterra modelu*.

jící na maximální době uvěznění a (ušlém) příjmu. Pravidlo pro aktivaci občana tedy zůstává stejné, jako v předchozím modelu:

Pokud platí $G - N > T$, občan je aktivní, jinak je pasivní.

Moro dodává, že parametr **T** lze vnímat i jako konstantní zisk z toho, že člověk si nechává své politické názory pro sebe.

Oproti tomu se revolucionáři aktivují globálně. Poněkud morbidní pravidlo je následující:

*Pokud $\frac{R+C}{P} > n$, buď aktivní a zabij náhodně vybraného policistu s pravděpodobností **r**, jinak zůstaň skrytý.*

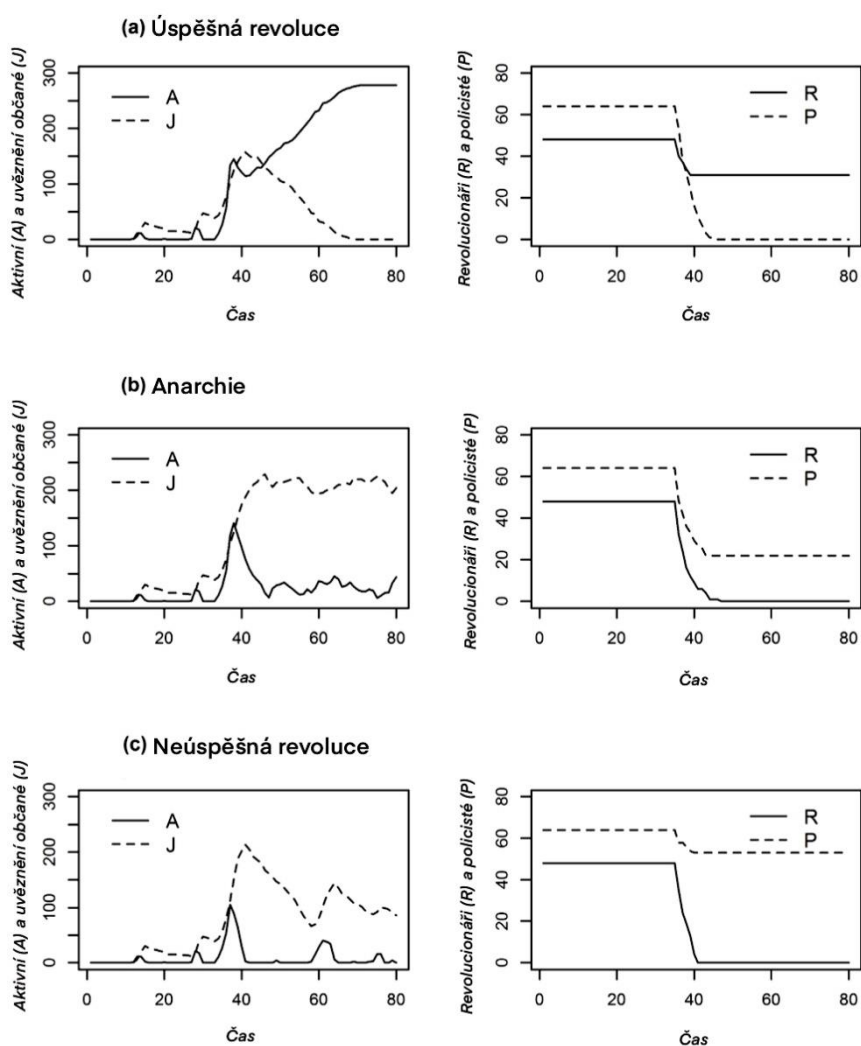
Zde **R** je celkový počet revolucionářů, **C** je celkový počet občanů a **P** celkový počet policistů.

Pravidlo pro policisty je podobné jako u *Epsteinova modelu*. V každém kroku se policista podívá na všechny aktivní občany a revolucionáře ve svém viditelném okolí, náhodně z nich jednoho vybere – občana zatkne a revolucionáře zabije s pravděpodobností **p**. Jakkoli jednoduchý je popis modelu, pravděpodobnosti **p** a **r** lze vnímat také jako míru účinnosti obou skupin ve vzájemné likvidaci. Většina parametrů modelu zůstává pro všechny simulace stejná. Parametry, které jsou proměnlivé, jsou převážně parametry **r**, **p** a parametr **n**.

Tento o něco složitější model se projevuje následujícími dynamickými charakteristikami: 1) mohou nastat tři různé scénáře – dojde k svržení režimu (policisté jsou přemoženi), revoluce selže (revolucionáři jsou potlačeni policií) a nebo dochází k anarchii, tedy se obě síly drží v šachu a nastává období otřesů a nepravidelností. Tyto situace jsou ilustrovány na Obrázku č. 4. Tyto tři scénáře autor přirovnává k situacím během Arabského jara, kdy podobné počáteční situace vyústily v různých zemích v odlišné scénáře (popořadě např. Tunisko, Bahrajn, Libye). 2) Revolucionáři mají v modelu výhodu oproti policistům, mohou se totiž schovat, tedy pro mnohem nižší hodnoty **r** dosahují většího účinku než policisté pro vyšší hodnoty parametru **p**. 3) V modelu můžeme vidět pozorovaný vztah mezi spontánními občanskými bouřemi a masovou organizovanou revolucí. Z modelu vyplývá, že je pro revolucionáře výhodnější spustit veškeré akce, až když dochází k určité míře občanské aktivity, ale na druhou stranu, nesmí se příliš dlouho otálet, jinak se revoluce nezažehne, neboť bude potlačena. 4) Z chování modelu vyplývá, že překlopení konkrétního nepokoje v revoluci je těžko předvídatelné. Chování modelu je

náhodné. 5) V modelu se objevují před-revoluční období charakterizované jednorázovými ekonomicky motivovanými nepokoji s následnou mobilizovanější masovou rebelií.

Obrázek č. 4: **Ilustrace úspěšné revoluce a), anarchie b) a neúspěšné revoluce c).** *A – počet aktivních občanů, J – počet uvězněných občanů (z angl. jailed), R – počet revolucionářů, P – počet policistů. Všechny grafy vynášejí ve svislé ose počty zmíněných typů agentů v čase znázorněném na vodorovné ose.*



Zdroj: Přeloženo a upraveno z (Moro 2016).

Rozdělení agentů na občany a skryté revolucionáře nahrává silně ve prospěch občanů orientovaných proti režimu. To nás přivádí na myšlenku reálnějšího modelu vyrovnávajícího síly, a to zavedení i skrytých policistů, kteří v mnoha totalitních režimech jistě figurují. Implementace a prozkoumání této varianty je v našem badatelském hledáčku. Oproti *Epsteinovu modelu* se dostáváme na úroveň měřitelnosti těžkosti života pomocí vyčíslení příjmu jednotlivce. Otázkou ale je, zda příjem jednotlivce a jeho rozdíl od průměru populace vykresluje plně těžkost života. Náhodné generování pomocí uniformních rozdělení u Epsteina je nahrazeno rozděleními reálněji modelující rozložení hodnot parametru v populaci. Pro ještě reálnější model by bylo vhodnější založit distribuce příjmů přímo na datech z modelovaných regionů. Ty ovšem může být velmi obtížné získat.

Makowského model vztahu centrální instituce a revoluce

Další model, který je kombinací ABM a síťového přístupu, nalezneme v článku (Makowsky – Rubin 2013). Autoři článku argumentují, že společnosti s centralizovanou autoritou moci a rozvinutými informačními technologiemi jsou náchylné k masivnímu odhalení preferencí jednotlivců, které jsou jinak udržovány jako privátní v obavách ze sankcí režimu. Určitá forma šoku může u některých jedinců spustit odhalení preferencí, což dále může vést ke kaskádě odhalování preferencí. Tato kaskáda může vést k revolučním událostem.

Prostředím modelu je opět dvoudimenzionální mřížka s topologií toru. V simulaci máme tři typy agentů – centrální autoritu, necentrální autoritu a občany. První dvě entity leží mimo tuto mřížku, agenti reprezentující občany jsou umístěni každý na jednom políčku mřížky. Každý občan i obě autority mají své blaho (*bliss*) definované jako reálné číslo. Tyto hodnoty jsou jim na počátku náhodně přiděleny z normálního rozdělení.

V jednom kroku simulace každá entita provádí akci, která je také reprezentována jako reálné číslo. Můžeme si to představit například tak, že určité spektrum akcí mapujeme na reálnou osu. Taková akce se vybírá na základě maximalizace užitkové funkce, kde akce je jedním z jejích parametrů. Pro občana dále tato funkce uvažuje vzdálenost od svého blaha, sankce centrální a necentrální autority a odchýlení od průměrné hodnoty blízkých občanů. Centrální i necentrální autorita uvažují v účelové funkci odchýlení od vlastního blaha a vzdálenost od průměrné akce všech občanů. Necentrální autorita v užitkové funkci uvažuje ještě odchýlení od akce centrální autority. Necentrální autorita může, ale nemusí, být konformní s centrální autoritou. Tato konformita se určuje číselným parametrem, který je možné vnímat jako *míru centralizace*.

Za zmínku stojí definice blízkého okolí občana. Každý agent se před výpočtem maximalizace užitkové funkce podívá na všechny buňky ve svém okolí

do určité dané vzdálenosti r . V tomto okolí nejprve vytvoří (sociální) síť vztahů, do které si přidá pevný počet n agentů, kteří v nedávné době konali akci nejbližší jeho vlastnímu blahu. Jelikož akce jsou číselné můžeme vyjádřit vzdálenost akcí jako absolutní hodnotu jejich rozdílu.

Simulace se nechá běžet po autory zvolenou dobu 20 kroků, poté se zvnějšku dostaví tzv. *šok*, kdy se občanům rapidně zvýší váhy, které přikládají svému vlastnímu blahu. Tento jev může mít následující vysvětlení. Při represivním režimu dochází k neventilování opravdových preferencí ale k ventilování těch, které přinesou co nejmenší penalizaci ze strany režimu. Autoři pro tento jev používají převzatý název *falsification of preferences* (dále jen FP). Při změně vah dochází k odkrytí vnitřních opravdových preferencí. Míru, do jaké jsou u občana preference falsifikovány, lze opět měřit absolutním rozdílem mezi jeho akcí a osobním blahem. Simulace končí krokem 40. Simulace jsou pouštěny pro různé kombinace parametrů (pro jednu kombinaci parametrů se simulace opakuje s náhodným nastavením celkem 50 krát). Celkový počet simulací je tak 42 tisíc.

Zmíněný model vykazuje v simulacích také zajímavé charakteristiky: 1) Stupeň FP roste s mírou centralizace a klesá s velikostí sociálního okolí občanů (parametr r). Tento parametr si lze vykládat i jako míru komunikace/šíření informací a zasíťování občanů. Určitým způsobem by závislost šlo vyložit dle autorů tak, že s menším sociálním okruhem individuí je menší pravděpodobnost setkání s lidmi stejného světonázoru a tudíž sociální normy individuí jsou dále od jejich blaha. Mohli bychom ale namítnout, že to platí pro velmi omezené sociální okruhy neboť i malá sociální okolí se mohou formovat právě v závislosti na podobnosti názorů. 2) Čím větší je centralizace, tím je větší míra změny FP po šoku. 3) Při dostatečné úrovni centralizace míra změny FP mezi stavy před a po šoku roste s velikostí sociálního okolí.

V modelu autoři chápou revoluci jako institucionální změny v centrální autoritě. Tuto změnu je možné měřit jako rozdíl mezi akcí centrální autority v čase 20 (těsně před šokem) a v čase 40 (na konci simulace). Dochází se k následujícím zjištěním. 4) Rozsah institucionální revoluce roste s mírou centralizace. 5) Míra s jakou rozsah institucionální revoluce roste v závislosti na velikosti sociálního okolí roste s mírou centralizace. Nicméně pokud je frakce revoltujících velmi velká, již tolik není potřeba širokého sociálního okolí.

Článek je mimo jiné zajímavý i tím, že se pokouší model propojit s empirickými daty z *World Values Survey*, kde respondenti mimo jiné vyjadřují stanoviska k protestním aktivitám různého charakteru. Velikost sociálního okolí se snaží v článku operacionalizovat jako počet uživatelů internetu na 100 osob. Míru centralizace zjišťují z šetření *Polity IV Project: Political Regime Charac-*

teristics and Transitions. Zahrnují i jiné parametry jako míru nezaměstnanosti, HDP, atd. Pomocí metody nejmenších čtverců se snaží určit závislost FP a přítomnosti revolučních změn na těchto proměnných. Výsledky zhruba potvrzují závislosti z jednotlivých dynamických charakteristik modelu. Nicméně je na místě otázka po správnosti operacionalizace jednotlivých pojmů.

Makowského model je podobně jako Epsteinův také jednoduchý, ale postihuje problematiku trochu jiným pohledem. Nicméně mu lze několik věcí vytknout. Lemos (Lemos et al. 2013) například zmiňuje určitou nereálnost zvoleného okolí, nebo to, že chybí diferenciací vlivů z různých zdrojů (rodina, vrstevníci, přátelé), atributy jako blaho či akce lze ještě hůře empiricky vyčíslit než u *Epsteinova modelu*. Mohli bychom mu vytknout také to, že autority nejsou fyzicky přítomné v prostředí a tedy není jasné jakým způsobem působí na aktéry. Dále i to, že událost šoku je zavedena externím zásahem a není tedy emergentní událostí modelu.

Nowakův model sociální změny

Poslední model, který představíme, je Nowakův model názorové polarizace společnosti (Nowak – Lewenstein 1996). Model zmiňujeme proto, že sám autor tuto názorovou polarizaci vnímá jako předzvěst sociální změny včetně revoluce. Jeho model využívá tzv. *celulární automaty*. V principu se jedná o velmi podobný nástroj jako agentově orientované modelování. Šlo by zjednodušeně říci, že ABM je zobecněním celulárních automatů. Nicméně tento pojem je v informatice ustálen a v této oblasti stále probíhá výzkum, proto ho nyní blíže vysvětlíme.

Zde v tomto textu budeme uvažovat celulární automaty, které mají za prostředí dvoudimenzionální mřížku složenou z políček.⁸ Každé políčko, které typicky reprezentuje právě jednoho agenta, má nastavenou různou číselnou hodnotu. Čas simulace opět plyne v diskrétních krocích. V každém kroku se přepočtou hodnoty všech políček. K tomu máme definované určité pravidlo, které je pro všechny políčka stejné, a které říká, jakým způsobem se bude hodnota políčka měnit. Tato změna je typicky závislá na hodnotách vybraných okolních políček. Takovým notoricky známým příkladem celulárních automatů je Conwayova *Game of life* viz například (Gardner 1970).

Nowakův model vypadá následovně. Každé políčko dvoudimenzionální mřížky se souřadnicemi i, j (i -tý řádek a j -tý sloupec) reprezentuje jednoho člena skupiny (můžeme si představit, že se členové nemohou hýbat a je jim na začátku pevně přidělena pozice). Každý člen má názor na určitou otázku. Autoři uvažují dvě varianty **pro** a **proti**. Sice nám může připadat mnohem

⁸ Obecně mohou celulární automaty pracovat s prostředím různých dimenzí.

vhodnější uvažovat pro názory celé kontinuum stanovisek (spíše nesouhlasí, mírně souhlasí apod.), ale podle empirických výzkumů, které Nowak provedl se zdá, že pokud se jedná o klíčovou oblast, mají lidé tendenci své názory polarizovat. Také Schelling argumentuje, že řada názorů má binární charakter (Schelling 1973).

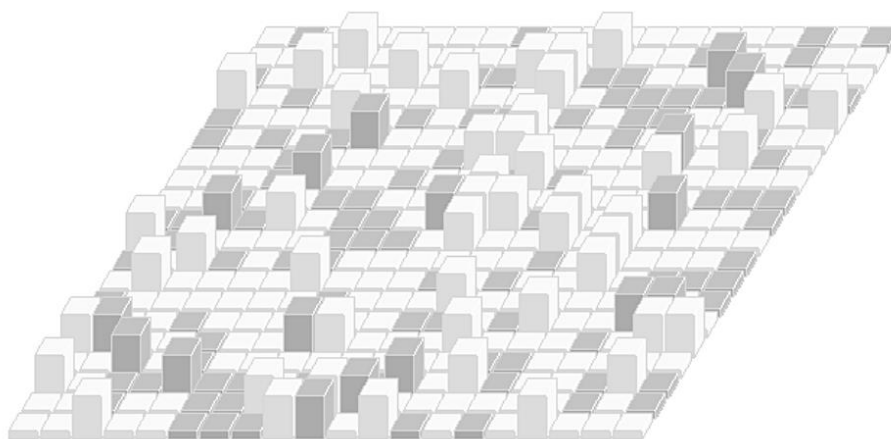
Důležitou vlastností členů je, že každý má svou definovanou sílu vlivu, která se napříč jedinci liší. Můžeme si ji představit tak, že každý jedinec má určitou sílu přesvědčit ostatní o svém stanovisku, nebo naopak podpořit ostatní ve stanovisku, které s nimi sdílí. Přestože se členové nemohou hýbat a stojí fixně na políčkách, interagují se svým okolím. Dle Nowakem zmíněného empirického pozorování pravděpodobnost interakce mezi jedinci klesá se čtvercem jejich fyzické vzdálenosti (Latané 1981).

Nyní zbývá definovat pravidlo pro změnu stanoviska jedince. Stanovisko **pro** je reprezentováno hodnotou 1, stanovisko **proti** je reprezentováno hodnotou -1. Jedinec při změně uvažuje své stávající stanovisko a i stanoviska všech ostatních členů. Všechny tyto dílčí stanoviska se váží mírou vlivu jedinců. Matematicky se výpočet nového stanoviska zapíše takto

$$s_{i,j}(t+1) = \text{sign} \sum_{k,l} V_{i,j}^{k,l} s_{k,l}(t),$$

kde $s_{i,j}(t)$ je stanovisko člena na pozici i, j v čase t , symbol $V_{i,j}^{k,l}$ značí míru vlivu člena lokalizovaného na pozici k, l na člena umístěného na pozici i, j . Míra vlivu se spočítá ze síly jedince na pozici k, l a přepočte se ještě úměrně ke čtverci vzdálenosti obou políček jedinců. Prvek $V_{i,j}^{k,l}$ vlastně můžeme vnímat jako míru, s jakou si jedinec stojí za vlastním stanoviskem. Takto se sečtou všechna vážená stanoviska a pokud je výsledek záporný nastaví se políčku hodnota -1, v opačném případě se políčku nastaví hodnota 1 (to činí ve vzorci právě funkce *sign*). Hodnoty stanovisek i počáteční síly vlivu jsou na začátku simulace přiděleny náhodně, předpokládáme, že uniformě. Na Obrázku č. 5 nalezneme příklad takové mřížky.

Obrázek č. 5: **Náhodná inicializace modelu.** Mřížka o rozměrech 20 x 20. Tmavá barva naznačuje hodnotu pro, světlá barva hodnotu proti, výše sloupce určuje sílu jedince.

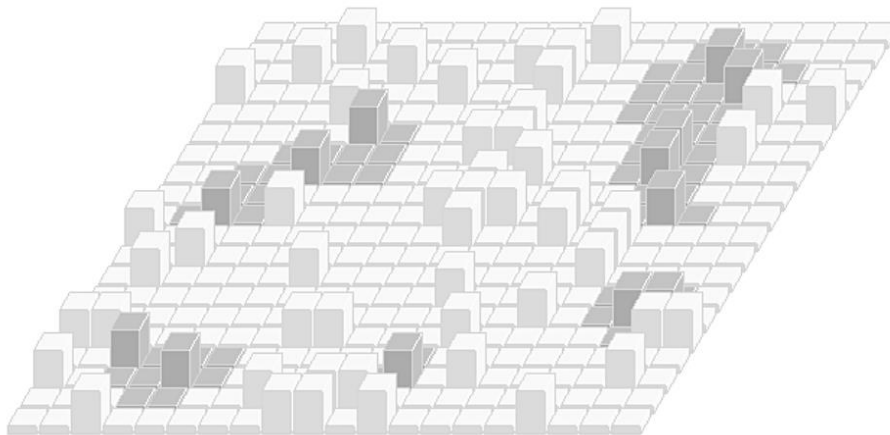


Zdroj: Převzato a upraveno z (Nowak – Lewenstein 1996).

Tento model vykazuje následující emergentní vlastnosti. Přes počáteční náhodné nastavení se po určité době situace typicky ustálí v rovnovážném stavu (minimálně dočasném). Tedy ve stavu, kdy žádný člen již nemění názory. Tyto ekvilibria jsou charakteristická dvěma vlastnostmi: 1) vznikají zde názorové ostrůvky složené z členů stejných názorů, 2) snižuje se počet členů zastávajících minoritní názor. Příklad takových ostrůvků vidíme na Obrázku č. 6. Z pohledu většiny jednotlivců to ale vypadá, že právě jejich názor je konzistentní s majoritním názorem v jejich okolí, a tedy s domněle globálním názorem.

Zajímavé je, že existuje celá řada stabilních konfigurací ostrůvků, které umožňují názorové minoritě přežít. Často se jedná o určitou konfiguraci malého počtu silných jedinců (můžeme říci lídrů se silným vlivem) a většího počtu slabších jedinců, tedy jedinců s malým vlivem: a) Lídr uprostřed obklopen slabšími jedinci, kteří ho odstiňují od okolí. Díky tomu na něj nemají ostatní vzdálenější jedinci vliv a nedonutí ho ke změně stanoviska. Lídr zase vynutí zachování stanoviska u slabších jedinců. b) Lídři tvoří hradbu mezi slabšími jedinci a okolním světem slabých jedinců s jiným stanoviskem. Nemusí se jednat o hustou hradbu, stačí poměrně malý počet lídrů. c) Lídři shluknutí pevně u sebe vytvářejí pevnou centrální oporu pro své okolí. Samozřejmě se mohou objevovat i kombinace zmíněných konfigurací.

Obrázek č. 6: **Názorové ostrůvky.** Tmavá barva značí hodnotu pro, bílá barva hodnotu proti, výše sloupečku určuje sílu jedince.



Zdroj: Převzato a upraveno z (Nowak – Lewenstein 1996).

Jistě důležité je zkoumání chování modelu vzhledem k procesu sociální změny. Můžeme se totiž na ni dívat jako na proměnu stanoviskové minority na majoritu a opačně. K takové sociální změně dochází dle Nowaka díky určitým externím vlivům. Ty nepůsobí přímo na stanoviska členů, ale skrze jejich interakci nabývají na účinku. Nowak tyto externí vlivy modeluje započítáním určitého vychýlení do výpočtu aktualizace stanoviska jedinců. Změnu provede tak, že při výpočtu budoucího stavu jsou členové náchylnější k určitému stanovisku (například vlivem propagandy). Tato změna během další simulace postupně způsobí rozšíření méně frekventovaných klastrů s minoritním názorem v klustry dominující. Stále nicméně přežívají drobné ostrůvky původně majoritního stanoviska. Nicméně při odebrání vychýlení ve výpočtu se situace mnohem rychleji vrátí do stavu, který je podobný ekvilibriu před přidáním vychýlení. Staré struktury, přestože jsou v menšině, mají tedy stále potenciál, který se využije při vhodné příležitosti a může způsobit rychlý retrográdní proces. Mohli bychom o tomto procesu uvažovat jako o určité formě paměti společnosti.

Modelu bychom mohli jistě vytknout určitě absenci mobility agentů. Pokud ale vnímáme umístění agentů jako jejich umístění v názorovém prostoru, lze tuto statickosti částečně odůvodnit. Podobně jako u předchozího modelu je možné vytknout nastavení vychýlení jako externího vlivu, který není výsledkem modelu. Přínosnou novinkou modelu, která se ale jinde v ABM běžně využívá, je zavedení síly působení jednoho jedince na druhého. Otázkou zůstává, jak takovou sílu empiricky měřit (nabízí se například operacionalizace po-

moci četnosti sociálních interakcí, míry interakce na sociálních sítích, příbuzenské blízkosti apod.)

Dva alternativní přístupy

Tato krátká sekce doplňuje text o odkazy na práce zastupující dva alternativní přístupy k modelování revolučních procesů – teorii her a rovníkové přístupy.

K modelování konfliktu se často využívá přístupů teorie her. Jako příklad můžeme uvést již zmiňovanou Bouldingovu monografii (Boulding 1963) nebo knihu (Schelling 1980). Teorii her využívá pro modelování revolučních procesů například model v (Ginkel – Smith 1999). Zde je vztah mezi vládou, disentem a masou lidí, která se rozhoduje, zda se vládě postaví, modelován jako hra s několika fázemi. Je definováno, ve které fázi jsou různí aktéři na tahu. Dle průchodu stromem hry se rozhodne, zda k revoluci dojde (participace širší masy lidí) či nikoliv. Model je velmi zjednodušený, ale vykazuje některé známé teoretické vlastnosti. Například je v souladu s Kuranovou hypotézou, že represivní režimy se spíše drží až do úplného konce a kolabují náhle místo pozvolné ztráty legitimacy (Kuran 1995). V dalším článku (Vanderschraaf 2008) je k analýze paradoxu anarchie⁹ (angl. *paradox of anarchy*) využit hybridní model, který kombinuje prvky teorie her a zmíněný přístup prahování.

Jako reprezentaty rovníkového přístupu můžeme uvést modely využívající diferenciálních rovnic. Zde už se nejedná o modelování z pohledu jednotlivých agentů, ale díváme se na celou situaci agregovaně z nadhledu. Modelujeme tak přímo vývoj hodnoty určité veličiny na makroúrovni, například poměr revoltujících občanů jako v (Lang – De Sterck 2014). Zde využívají takzvaný kompartmentový model, kde populace je rozdělena na dva kompartmenty – ti, co participují, a ti, co neparticipují na revoluci. Pro stavbu rovnic využívají několik parametrů jako je viditelnost protestů, entusiasmus protestujících či efektivnost dohledu režimu a jeho maximální kapacita v tomto ohledu. Hlavním cílem článku je modelovat vliv médií jako jsou internet či sociální sítě na průběh revoluce v různých případech revolucí Arabského jara. Konkrétní průběh v jednotlivých modelových případech zemí (např. i Írán, Čína a Somálsko) je ukázán na dynamice změny těchto parametrů. Jiným příkladem využití diferenciálních rovnic je (Petukhov et al. 2016). V článku využívají vlastní koncept tzv. sociální energie. Je zde načrtnuto, jak společenský konflikt modelovat jako přemísťování energie v sociálním poli.

⁹ Paradoxem anarchie Vanderschraaf popisuje situaci, kdy válka v režimu anarchie je nevyhnutelná, přestože ani jedna ze stran válčit nechce, viz (Vanderschraaf 2008).

Přínos agentově orientovaných simulací

Představili jsme několik počítačových agentově orientovaných modelů revolučních procesů. Jaký přínos ale takové modely mohou mít pro sociální vědy studující tyto procesy? V této sekci shrneme řadu úvah známých autorů i úvah vlastních.

Jedním z přínosů výpočetních agentově orientovaných přístupů je, že tyto modely leží na půli cesty mezi přirozeným jazykem a jazykem matematiky (Moretti 2002). Některé popisy procesů v přirozeném jazyku totiž mohou být nejednoznačné a může být obtížné, ba nemožné, převést je do matematického jazyka. Navíc u teorie formulované v přirozeném jazyku může být mentálně náročné prozkoumat obtížné implikace vyžadující dlouhou posloupnost myšlenkových kroků. Jazyk matematiky je na druhou stranu poměrně „chudý“ a neumožňuje nám zachytit některé jemné nuance a neurčitosti. Popisem modelu, ať už přístupem KISS, či metodou KIDS, dostáváme v kombinaci se sérií následných experimentů určitý alternativní popis teorie vrhající nové světlo na vztahy mezi parametry, příčinou a následkem.

Pro studium složitých dynamických systémů občas nemáme jinou možnost než studovat je skrze (počítačovou) simulaci. Pokud navíc chceme zkoumat systém z pohledu interakce jednotlivců, nabízí se využít nástrojů ABM. Nejspíš nemůžeme očekávat detailní predikci budoucího vývoje systému. Můžeme však statisticky zkoumat, za jakých podmínek se určitý jev v systému objeví (emerguje). Můžeme zkoumat určité křížovatky trajektorií dynamiky systémů, tedy sady podmínek, za kterých určitý jev (ne)nastává nebo například se modelový systém ustálí v ekvilibriu.

Simulace nám také mohou pomoci nahlédnout situace, které by reálným experimentem nebylo možné zkoumat. Jednak můžeme parametrům nastavovat hraniční či v reálu nepozorované hodnoty, čímž můžeme poodkrývat lákavou otázku „Co kdyby?“. Je zde tak vlastně k dispozici virtuální sociologická laboratoř, ve které systémy můžeme zkoumat jinými nástroji než umožňují „klasické“ sociologické nástroje.

K počítačové simulaci se můžeme také uchýlit, pokud se jedná o jevy nemožné přímo experimentálně ověřit. Důvodů může být několik, například jednorázovost a historičnost zkoumaného jevu, neetičnost reálného experimentu nebo jeho rozsáhlost/nákladnost. Známým příkladem využití ABM ke zkoumání historického jevu je problém zmizení severoamerické kultury Anasazi (Dean et al. 2000). Jako příklad experimentu nerealizovatelného v reálu kvůli nákladům a etickým či bezpečnostním rizikům můžeme uvést modelování nouzové evakuace stadionu (Zhang et al. 2014).

Domníváme se, že důležitým aspektem ABM je též to, že taková počítačová simulace do jisté míry překlenuje propast mezi mikro a makro úrovní a vzta-

hem mezi aktéry a strukturou (Halpin 1999). Vycházíme-li z vlastností interakcí v počítačovém modelu pro jednotlivé aktéry, mohou tyto způsobit právě zmiňovanou emergenci (strukturálních) jevů na makro úrovni. Můžeme tak zkoumat nastavení parametrů, za kterých se tyto jevy vynořují. Díky simulaci navíc toto propojení můžeme paralelně nahlédnout. Například můžeme zároveň pozorovat jak proměnu parametrů jedinců, tak i vynořující se vzorce a struktury na vyšší úrovni, například s pomocí grafů a animací.

Počítačová simulace nám může vrhnout nové světlo na validitu našeho teoretického sociálně-vědního modelu. Nicméně si nemyslíme, že je zcela možné simulací teoretický model potvrdit. Diskuze o vztahu sociologické teorie a počítačových modelů vydá na samostatnou práci a je zpracována například v (Schenk 2020). Pokus o přeformulování teorie do počítačového jazyka nám nicméně může pomoci odřezat „přebytečné“ části naší teorie a dosáhnout tak lepší úrovně abstrakce při zachování vysvětlující hodnoty.

Výhodou ABM mohou být i víceméně technické záležitosti týkající se úspory času nebo mentální kapacity. Počítačové simulace je možné pouštět opakovaně pro různá počáteční nastavení a různé kombinace parametrů. V závislosti na komplexitě modelu je lze provádět i s rozsáhlými populacemi agentů, které bychom při mentálním uvažování či modelování na papíře v sociálních vědách nebyli schopni vyhodnotit. V kontextu s počítačovým agentově orientovaným modelováním opět připomínáme koncept virtuální sociologické laboratoře, která umožňuje humanitním vědám přemýšlet nad sociální realitou pomocí jiných než klasických teoretických a empirických nástrojů.

Kritika agentově orientovaných přístupů

Při práci s počítačovými agentově orientovanými modely se nabízí otázka, zda lze analýzy modelů dát do vztahu s reálným světem. Negativní odpověď na tuto otázku může vést k předčasnému zavržení nástrojů ABM jako celku. Domníváme se však, že velmi těžko půjde odpověď nalézt v obecné rovině. Daleko snadnější bude zamýšlet se vždy v konkrétním případě konkrétního problému a modelu. Nelze tedy přímo souhlasit s paušálním hodnocením, že agentové modelování poskytuje pouze hříčkové modely (tzv. *toy models*), které s realitou nesouvisí. I velmi idealizované abstraktní modely vytvořené přístupem KISS, mohou pomoci pochopit základní mechanismus zkoumaného procesu, který pak může být podkladem pro zesložitování modelu nebo pro empirickou studii v reálném světě. To jsme konec konců viděli i u zmíněných modelů revolučních procesů.

Důležitým problémem týkajícím se vztahu simulace a reality je přeložitelnost některých „měkkých“ pojmů do jazyka počítačové simulace. Takové pojmy jsme v našich simulacích potkali. Jedná se například o míru frustrace, těžkost života apod. Pokud například, a to je v počítačové simulaci častým

způsobem, reprezentujeme frustraci číslem z intervalu $[0, 1]$, s tím, že 0 značí nejnižší a 1 nejvyšší míru frustrace, můžeme se potom ptát, co by znamenalo v reálném světě, pokud se nám v simulaci objeví u aktéra frustrace s hodnotou 0,33. U některých modelů, jak jsme viděli, nalezneme i snahu tyto parametry operacionalizovat, například sestavit koeficienty odrážející frustraci, které jsou založené na reálných datech, viz například (Makowsky – Rubin 2013).

Jsou zde nicméně i názory, že některé aspekty humanitních věd nelze plně zachytit pomocí formálních matematických nástrojů (Nowak – Lewenstein 1996), neboť každým takovým překladem dochází k určitému zjednodušení sociálních procesů. Na druhou stranu je potřeba připustit, že každý budovaný model je určitou formou zjednodušení sociální reality, které bere v úvahu jen ty prvky a vztahy, které jsou z hlediska výzkumného záměru považované za podstatné (Schenk 2020). Opět i zde se domníváme, že to, zda je zjednodušení přípustné, je vhodné posuzovat na konkrétní dvojici modelovaného problému a souvisejícího modelu.

S tímto bodem souvisí i kritika, že některé faktory se obtížně do modelu zakomponovávají – například, pokud chceme zakomponovat do rozhodovacích mechanismů vliv zkušeností z dětství, aktuální emoce apod. Na druhou stranu bychom ale mohli dodat, že výzkumy behaviorální ekonomie ukazují, že v některých případech se tyto komplexní rozhodovací struktury u lidí při rozhodování obcházejí, viz např. (Kahneman 2011), a lidé se rozhodují podle mnohem jednodušších pravidel. Také můžeme vidět snahy zakomponovat kvalitativní data do agentových modelů, jak to činí například s etnografickými daty v (Yang – Gilbert 2008), kde využívají jisté metodologické podobnosti v přístupu etnografie a agentového modelování.

Další námitkou je, že během simulace není generována nová znalost. Jednoduchá pravidla a vstupní parametry je potřeba do modelu na začátku vložit (Nowak – Lewenstein 1996). Proti tomu by se ale dalo namítnout, že v modelech očekáváme určitou formu emergence, kdy se produkují nové kvality, které do modelu nebyly a priori zaneseny. Pokud by byla na obtíž dosud nevyjasněná povaha této emergence, jak jsme dříve v textu zmiňovali, existují i pokusy navrhnout modely se sadami pravidel schopnými vlastní evoluce, viz například článek (Goh et al. 2006).

Obecně může být také problém s validací modelu. Stále totiž chybí obecnější metodika validace. I když řada takových pokusů existuje, viz například článek (Moss – Edmonds 2005) nebo (Louie – Carley 2008). U vysoce abstraktních modelů může být problém zjistit, zda použité modelové entity a jejich parametry či pravidla jsou jen hypotetické konstrukty, či mají reálný předobraz.¹⁰

¹⁰ Tomuto problému se říká hypostaze či hypostazování. Více viz například <https://encyklopedie.soc.cas.cz/w/Hypostaze> [dostupné na internetu 4. 5. 2024].

Při konstruování modelů metodou KISS je právě v empirických datech možné nalézt inspiraci pro procesy, které je vhodné modelovat a jak model sestavit. Jelikož při konstruování modelů metodou KIDS je snahou co největší podobnost s reálným systémem, může nastat i problém s nedostatkem empirických dat, pomocí kterých je možné model specifikovat a kalibrovat.

Přestože jsme schopni simulovat velké množství agentů (řádově statisíce i miliony), může být stále značně výpočetně náročné simulovat rozsáhlejší modely s komplexnějšími pravidly interakcí. Zvláště pokud chceme dosáhnout simulace v reálném čase. S rostoucí výpočetní náročností pak čím dál více musíme uvažovat efektivnost počítačové implementace (složitost algoritmů, paralelizace výpočtů), která je již typicky mimo oborový rámec nejen sociálních vědců, ale i velkého množství odborníků z oblasti informatiky. Také nesmíme zapomenout, že výpočetní problémy může způsobovat i samotná vizualizace rozsáhlých simulačních výstupů – animací či komplexních sítí.

Závěr

V článku jsme představili čtyři agentově orientované modely revolučních procesů. Modely se liší typy použitých agentů, jejich rozhodovacími mechanismy a také různou prací s empirickými daty. Obecně by je však bylo možné zařadit spíše do kategorie modelů konstruovaných způsobem KISS.

Porovnání modelů navzájem ztěžuje fakt, že každý z modelů chápe pojem revoluce odlišným způsobem. V prvním modelu (Epstein 2002) je to lokální vlna manifestování občanských nespokojeností, ve druhém modelu (Moro 2016) je to projevované občanské násilí, ve třetím modelu (Makowsky – Rubin 2013) jde o vzájemný vliv centrální a necentrální autority a občanů, a konečně ve čtvrtém modelu (Nowak – Lewenstein 1996) jde o názorovou polarizaci společnosti.

Představené modely byly zvoleny tak, aby odrážely aktuální stav využití počítačového ABM pro modelování revolučních procesů. Zároveň na nich byl demonstrován styl agentově orientovaného uvažování nad sociální realitou. Většinou se jednalo o modely jednoduché, avšak s překvapivými emergujícími jevy či vlastnostmi. Tyto analýzy jsme příležitostně doplnili odkazy na dřívější sociálně-vědní výsledky, které s nimi určitým způsobem korespondují.

Nosným přístupem v ABM by mohlo být propojení těchto modelů s jinými počítačovými nástroji – analýzou komplexních sítí či strojovým učením. Dále se nabízí například využití automatického zpracování dat pro kalibraci modelů. Například ve studii (Juřík et al. 2023) využívají data z lidmi ovládané virtuální reality pro kalibraci virtuálních agentů při modelování evakuace. Domníváme se, že je též žádoucí, aby tyto výpočetní modely zároveň poskytovaly na určitých místech kontaktní spoje pro vstup teorií z jiných oborů – sociologie, psy-

chologie, antropologie apod. Samozřejmě to vše při zachování rozumného poměru komplexity a explanační síly modelů (Lazer et al. 2009).

Využití počítačového agentově orientovaného modelování je v sociální vědě stále na počátku. Přestože jsme schopni simulovat velké množství aktérů při velkých sadách různých počátečních podmínek, zatím chybí komplexita popisu jednání aktérů a tedy i komplexní popis revolučních procesů. V kontextu revolučních procesů je identifikace různých podprocesů a jejich provázanosti jistě cílem i klasičtějších přístupů v sociálních vědách. Samotná problematika revolučních procesů totiž stále nabízí řadu nevyřešených paradoxů a otevřených otázek. Přispívá k tomu i to, že revoluce v 21. století se projevují v nových formách a získávají nové charakteristiky (Goldstone 2022).

Společný zájem sociálních vědců a badatelů z oblasti počítačového modelování, jako by volal po propojení sil. Přesto však cítíme určitou oddělenost na úrovni výzkumníků. Ať však chceme, či nikoliv, počítačové nástroje (nejen počítačová simulace) a sociální vědy se stále více prolínají. Díky nárůstu výpočetní síly i díky zlepšení metodiky tohoto propojení se mohou techniky ABM stát inspirujícím pomocníkem při uvažování o sociální realitě a stejně tak oblast modelování může vzkvétat z výzkumů klasických sociálně-vědních metod. Epstein se dokonce v článku (Epstein 1999) domníval, že právě agentově orientované modelování by mohlo poskytnout přirozenou bázi pro interdisciplinární spolupráci ve společenských vědách. A skutečně existují projekty, kde ABM bylo využito jako základní komunikační platforma mezi badateli napříč obory, viz například (Reilly et al. 2021).

Důležitou roli ale nepochybně hraje i osvěta týkající se možného interdisciplinárního propojení v sociálně-vědních i přírodně-vědních studijních programech, ke které se snaží přispět i tento článek. Na své odpovědi však čeká řada zatím nevyjasněných metodologických otázek týkajících se technik ABM. Nesmíme ani zapomenout na vyjasňování otázek týkajících se vztahu ABM a budování sociálně-vědní teorie. V neposlední řadě jsou všudypřítomné i etické otázky týkající rozvoje těchto modelů, které jdou ruku v ruce s rozvojem každé technologie.

***Jaroslav Horáček** je VŠ pedagog a vědecký výzkumník. Získal magisterský titul v oborech Umělá inteligence na MFF UK a Historická sociologie na FHS UK. Doktorát zaměřený na aplikovanou matematiku absolvoval na MFF UK. Aktuálně dokončuje druhé doktorské studium v oboru Historická sociologie na FHS UK. Zabývá se agentově orientovaným modelováním společenských jevů z interdisciplinární perspektivy. Mezi jeho další odborné zájmy patří umělá inteligence a společenské dopady informačních technologií. Tyto více výpočetní zájmy vyvažuje zaujetím v sociologii a sociální psychologii města, umění a každodennosti.*

Karel Černý získal magisterský a následně doktorský titul v oboru sociologie na FF UK. Je odborníkem na problematiku Blízkého východu a událostí souhrnně označovaných jako Arabské jaro. Publikoval již na tato témata řadu článků v českých i mezinárodních periodikách. Pracoval na několika grantových projektech mimo jiné je hlavním řešitelem 2 projektů GAČR a je hlavním řešitelem projektu PRIMUS. Zúčastnil se řady stáží (např. Santa Barbara - USA, Qom - Írán). Je držitelem řady ocenění (např. Fulbright fellowship, cena Jaroslava Krejčího, stipendium Husovy nadace).

LITERATURA

- AXELROD, R., 1994: A Model of the Emergence of New Political Actors. In: Gilbert, N., Conte, R. (eds.): *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life*. London: University College Press, s. 19-36.
- AXTELL, R., 2000: Why agents?: On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences. In: Axtell, R. (eds.): *Proceedings of the Workshop on Agent Simulation: Applications, Models and Tools*. Argonne: Argonne National Laboratory, s. 3-24.
- BONABEAU, E., 2002: Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(3): 7280-7287. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- BOULDING, K. E., 1963. *Conflict and Defense: A General Theory*. New York: Harper & Row.
- BRINTON, C., 1965: *The Anatomy of Revolution*. New York: Vintage Books.
- ČERNÝ, K., 2016: Staré a nové teorie revoluce: deset perspektiv. *Acta Universitatis Carolinae Philosophica et Historica* 22(2): 73-96.
- DAVIES, J. C., 1962: Toward a Theory of Revolution. *American Sociological Review* 27(1): 5-19.
- DEAN, J. S. – GUMERMAN G. J. – EPSTEIN, J. M. – AXTELL, R. L. – SWEDLUND, A. C. – PARKER, M. T. – MCCARROLL, S., 2000: Understanding Anasazi Culture Change through Agent-Based Modeling. In: Kohler, T., Gumerman, G. (eds.): *Dynamics in Human and Primate Studies*. Oxford University Press, s. 179-205. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780195131673.003.0013>
- EPSTEIN, J. M., 1999: Agent-Based Computational Models and Generative Social Science. *Complexity* 4(5): 41-60.
- EPSTEIN, J. M., 2002: Modeling Civil Violence: An Agent-Based Computational Approach. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(3): 7243-7250. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.092080199>
- FORAN, J., 1993: Theories of Revolution Revisited: Toward a Fourth Generation?. *Sociological Theory* 11(1): 1-20.
- GARDNER, M., 1970: The Fantastic Combinations of John Conway's New Solitaire Game "Life" by Martin Gardner. *Scientific American* 223(1970): 120-123.

- GILBERT, N., 2019: *Agent-Based Models*. Thousand Oaks, California: Sage Publications.
- GINKEL, J. – SMITH, A., 1999: So You Say You Want a Revolution: A Game Theoretic Explanation of Revolution in Repressive Regimes. *Journal of Conflict Resolution* 43(3): 291-316.
- GOH, C. K. – QUEK, H. Y. – TAN, K. C. – ABBASS, H. A., 2006: Modeling Civil Violence: An Evolutionary Multi-Agent, Game Theoretic Approach. In: Lorini, E. (eds.): *Proceedings of the Eleventh European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS 2013)*, s. 1624-1631.
- GOLDSTONE, J. A. – GRININ, L. – KOROTAYEV, A., 2022: The Phenomenon and Theories of Revolutions. In: Goldstone, J. A., Grinin, L. and Korotayev, A. (eds.): *Handbook of Revolutions in the 21st Century: The New Waves of Revolutions, and the Causes and Effects of Disruptive Political Change*. Cham: Springer International Publishing, s. 37-68.
- GRANOVETTER, M., 1978: Threshold Models of Collective Behavior. *American Journal of Sociology* 83(6): 1420-1443.
- GURR, T., 1968: Psychological Factors in Civil Violence. *World Politics* 20(2): 245-278.
- HALPIN, B., 1999: Simulation in Sociology. *American Behavioral Scientist* 42(10): 1488-1508.
- HUSÁKOVÁ, M., 2006: Agentově orientované modelování a simulace. [dostupné na internetu 4.5.2024] http://lde.uhk.cz/fim/ucitel/fshusam2/lekarnicky/zt3/zt3_dokumenty/AgentModelSimul.pdf.
- JUŘÍK, V. – UHLÍK, O. – SNOPOKOVÁ, D. – KVARDA, O. – APELTAUER, T. – APELTAUER, J., 2023: Analysis of the Use of Behavioral Data from Virtual Reality for Calibration of Agent-Based Evacuation Models. *Heliyon*, 9(3).
- KALVAS, F., 2016: Multiagentní modelování: Budování modelu segregace krok za krokem. *Data a výzkum-SDA Info* 273, s. 1-34.
- KLEIN, D. – MARX, J. – FISCHBACH, K., 2018: Agent-Based Modeling in Social Science, History, and Philosophy. An Introduction. *Historical Social Research* 43(1): 243-258.
- KRČKOVÁ, A., 2013: Multiagentní modelování v sociologii: úvod do tématu. *Data a výzkum* 7(2): 167-186. DOI: <http://dx.doi.org/10.13060/23362391.2013.127.2.38>
- KREJČÍ, J., 1968: Sociologický model revolučního procesu. *Sociologický časopis / Czech Sociological Review* 4(2): 159-173.
- KURAN, T., 1995: *Private Truths, Public Lies: The Social Consequences of Preference Falsification*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- LANG, J. C. – DE STERCK, H., 2014: The Arab Spring: A Simple Compartmental Model for the Dynamics of a Revolution. *Mathematical Social Sciences* 69: 12-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mathsocsci.2014.01.004>
- LATANÉ, B., 1981: The Psychology of Social Impact. *American Psychologist* 36(4): 343-356.
- LAZER, D. – PENTLAND, A. – ADAMIC, L. – ARAL, S. – BARABÁSI, A. L. et al., 2009: Computational Social Science. *Science* 323(5915): 721-723.

- LEMOS, C. – COELHO, H. – LOPES, R. J. et al., 2013: Agent-Based Modeling of Social Conflict, Civil Violence and Revolution: State-of-the-art Review and Further Prospects. In: Lorini, E. (eds.): Proceedings of the Eleventh European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS 2013), s. 124-138.
- LEMOS, C. M., 2018: Agent-Based Modeling of Social Conflict: From Mechanisms to Complex Behavior. Switzerland: Springer.
- LOTKA, A. J., 1910: Contribution to the Theory of Periodic Reactions. The Journal of Physical Chemistry 14(3): 271-274.
- LOUIE, M. A. – CARLEY, K. M., 2008: Balancing the Criticisms: Validating Multi-Agent Models of Social Systems. Simulation Modelling Practice and Theory 16(2): 242-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2007.11.011>
- MACY, M. W. – WILLER, R., 2002: From Factors to Actors: Computational Sociology and Agent-Based Modeling. Annual Review of Sociology 28(1): 143-166.
- MAKOWSKY, M. D. – RUBIN, J., 2013: An Agent-Based Model of Centralized Institutions, Social Network Technology, and Revolution. PloS one 8(11): e80380. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080380>
- MATHIAS, M., 2016: Agentové systémy ako nástroj sociologického skúmania. Sociológia 48(1): 25-47.
- MENDEL, M., 2015: Arabské jaro: Historické a kulturné pozadí udalostí na Blízkom východe. Praha: Academia.
- MORETTI, S., 2002: Computer Simulation in Sociology: What Contribution?. Social Science Computer Review 20(1): 43-57. DOI: <https://doi.org/10.1177/089443930202000105>
- MORO, A., 2016: Understanding the Dynamics of Violent Political Revolutions in an Agent-Based Framework. PLOS one 11(4): e0154175. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154175>
- MOSS, S. – EDMONDS, B., 2005: Sociology and Simulation: Statistical and Qualitative Cross-Validation. American Journal of Sociology 110(4): 1095-1131. DOI: <https://doi.org/10.1086/427320>
- NETRVALOVÁ, A., 2005: Úvod do problematiky multiagentních systémů [dostupné na internetu 4.5.2024] <http://www.kiv.zcu.cz/~netrvalo/phd/MAS.pdf>.
- NOWAK, A. – LEWENSTEIN, M., 1996: Modeling Social Change with Cellular Automata. In: Hegselmann, R., Mueller, U., Troitzsch, K. G (eds.): Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View. Dordrecht: Kluwer, s. 249–285.
- PETUKHOV, A. Y. – MALKHANOV, A. O. – SANDALOV, V. M. – PETUKHOV, Y. V., 2016: Modeling Conflict in a Social System Using Diffusion Equations. Applied Nonlinear Dynamics 24(6): 65-83. DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549718761573>
- REILLY, A. C. – DILLON, R. L. – GUIKEMA, S. D., 2021: Agent-Based Models as an Integrating Boundary Object for Interdisciplinary Research. Risk Analysis, 41(7):1087–1092.

- SCHELLING, T. C., 1969: Models of Segregation. *American Economic Review* 59(2): 488-493.
- SCHELLING, T. C., 1973: Hockey Helmets, Concealed Weapons, and Daylight Saving: A Study of Binary Choices with Externalities. *Journal of Conflict Resolution* 17(3): 381-428.
- SCHELLING, T. C., 1980: *The Strategy of Conflict: with a new Preface by the Author.* Harvard University Press.
- SCHENK, J., 2011: Metodologické problémy multiagentového modelovania v sociológii. Bratislava: Stimul, 163s. http://stella.uniba.sk/texty/JS_modelovanie_sociologia.pdf
- SCHENK, J., 2017: Explanačné modely v súčasnej analytickej sociológii. Bratislava: Stimul.
- SCHENK, J., 2020: Experiment, model a teória v sociológii. Vybrané metodologické problémy. Bratislava: Stimul.
- SITUNGKIR, H., 2004: On Massive Conflict: Macro-Micro link. *Journal of Social Complexity* 1(4): 1-12.
- TISUE, S. – WILENSKY, U., 2004: Netlogo: A Simple Environment for Modeling Complexity. *International Conference on Complex Systems* Vol. 21. s. 16-21.
- VANDERSCHRAAF, P., 2008: Game Theory Meets Threshold Analysis: Reappraising the Paradoxes of Anarchy and Revolution. *The British Journal for the Philosophy of Science* 59(4): 579-617. DOI: <https://doi.org/10.1093/bjps/axn025>
- VAN DYKE, P. H. – SAVIT, R., – RIOLO, R. L., 1998: Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide. In: Sichman, J., Conte, R., and Gilbert, N., (eds.): *Multi-Agent Systems and Agent Based Simulation (Lecture Notes in Computer Science)*, Springer, s. 10-25.
- WILENSKY, U. – RAND, W., 2015: *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo.* Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- WOOLDRIDGE, M., 2009: *An Introduction to Multiagent Systems.* Hoboken, New Jersey: John Wiley & sons.
- YANG, L. – GILBERT, N., 2008: Getting Away from Numbers: Using Qualitative Observation for Agent-Based Modeling. *Advances in Complex Systems* 11(2): 175–185. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219525908001556>
- ZHANG, L. – WANG, J. – SHI, Q., 2014: Multi-Agent Based Modeling and Simulating for Evacuation Process in Stadium. *Journal of Systems Science and Complexity* 27(3): 430-444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11424-014-3029-5>