

ТЕОРІЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ

Розглядаються основні підходи до розробки агентно-орієнтованих моделей обчислювальної економіки. Визначаються характерні риси та основні компоненти агентно-орієнтованих моделей (АОМ). Розглядається поняття «агент». Наводяться основні цілі створення агентно-орієнтованих моделей. Пояснюються деякі способи класифікації АОМ. Надається короткий огляд моделей MOSES та EURACE.

© Д.А. Омелянчик, 2013

Теорія оптимальних рішень. 2013

УДК 330.46

Д.А. ОМЕЛЯНЧИК

АГЕНТНО-ОРИЄТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОНОМІКИ: ОСОБЛИВОСТІ, ВИДИ, ПРОБЛЕМИ

Вступ. Останні кілька десятиліть показали, що однією з найактуальніших проблем органів державного управління є неспроможність традиційної економіки передбачити кризи та нездатність адекватно проаналізувати усі небезпечні наслідки реформування народного господарства. Питання прийняття оптимальних рішень відповідальними особами при уявленні про економіку як складну адаптивну систему, поведінка якої формується за рахунок множинних взаємодій агентів, що володіють різною поведінкою, здатністю до навчання та є гетерогенними за своєю природою, є предметом агентно-орієнтованого моделювання.

Агентно-орієнтоване моделювання економіки – це галузь міждисциплінарних досліджень, що включає поведінкову економіку, теорію мереж, імітаційне моделювання, теорію хаосу, а також ідеї, запозичені з фізики, когнітивної психології, біології та інших природничих і соціальних наук [1]. За допомогою методів комп'ютерних наук розробники агентно-орієнтованих економічних моделей намагаються створити таку комп'ютерну симуляцію реального світу, в якій можна буде перевіряти наслідки різних сценаріїв дій та вибирати оптимальний напрям, прогнозувати розвиток економічних систем, аналізувати причинно-наслідкові зв'язки між змінними.

Мета цієї роботи – розглянути ряд перспективних напрямів у дослідженні агентно-орієнтованих моделей (АОМ), а також особливості, компоненти і види таких моделей.

1. Що таке агентно-орієнтовані моделі обчислювальної економіки?

Агентно-орієнтована обчислювальна економіка – це дисципліна, яка займається вивченням економічних процесів, що моделюються за допомогою динамічних систем взаємодіючих агентів. Під «агентом» тут розуміється сутність, що є складовою частиною штучно створеного світу й об'єднує у собі набір даних та методів поведінки. Можливими прикладами агентів є індивіди (споживачі, робітники), соціальні групи (сім'ї, фірми, урядові агенції), інститути (ринки, регуляторні системи), біологічні (посіви, худоба, ліси) та фізичні (інфраструктура, погода, географічний регіон) сутності. Таким чином, діапазон можливих агентів включає як активні об'єкти, що збирають дані, приймають рішення і мають здатність навчатися, так і пасивні властивості світу без когнітивних можливостей. Більше того, агенти можуть складатися з інших агентів, утворюючи ієрархічні конструкції. Наприклад, фірма може складатися з працівників.

Розробник АОМ задає початковий стан економічної системи, визначаючи початкові дані та методи поведінки для кожного агента та ступінь доступності цих даних та методів для інших агентів. Дані агента можуть включати атрибути типу (світ, ринок, фірма, споживач), структурні атрибути (географічне положення, функція витрати, функція корисності) та інформацію про атрибути інших агентів (адреси). Методи агентів можуть включати соціальні (ринкові протоколи) і приватні методи поведінки. Приклади останніх включають стратегії виробництва та ціноутворення, алгоритми навчання для оновлення стратегій і методи зміни методів. Підсумкова АОМ має бути динамічно повною. Це означає, що змодельована економічна система має бути здатна розвиватися у часі на основі взаємодій агентів самостійно, без подальших втручань розробника [2].

2. Характерні риси АОМ. АОМ мають ряд особливостей, які відрізняють їх від інших моделей. Сформулюємо коротко основні риси, що притаманні АОМ.

1. *Погляд «знизу догори».* Макродинамічні властивості можна правильно зрозуміти тільки як результат мікродинаміки агентів. Агреговані властивості виникають в результаті повторюваних взаємодій між простими агентами, а не внаслідок вимог раціональності та рівноваги, як припускається в класичних моделях.

2. *Гетерогенність.* Агенти завжди неоднорідні за всіма характеристиками.

3. *Нелінійність.* Характер взаємодій між агентами нелінійний, а, отже, і характер зв'язку між модельним рівнем та макрорівнем також нелінійний.

4. *Ендогенність взаємодії між агентами.* Рішення, що приймаються агентом в поточний момент часу за допомогою механізму адаптивних очікувань, залежить від рішень решти агентів у попередні моменти часу.

5. *Обмежена раціональність.* Через надзвичайну складність середовищ взаємодії економічних агентів припущення про раціональність є невірогідним. Агентам надаються, щонайбільше, деякі локальні та частинні (як у просторі, так і в часі) принципи раціональності, так звані міопічні оптимізаційні правила.

6. *Здатність до навчання.* Агенти в моделі навчаються за допомогою нескінченного пошуку в динамічних середовищах. Насправді, агенти початково не

наділені розумінням основоположної структури середовища, але вони мають розвинути своє уявлення про неї. Введення нових об'єктів змінює цю структуру, а, отже, винагороду за дії агентів, що тільки підкріплює нескінченність пошуку.

7. *Справжня невизначеність.* АОМ характеризуються незворотною динамікою: стан системи розвивається в залежності від пройденої траєкторії, що частково є наслідком адаптивних очікувань, оскільки агенти володіють інформацією про минуле та формують на її основі очікування майбутнього.

8. *Постійні ендогенні інновації.* Соціально-економічні системи завжди нестационарні. Неперервне створення нового в цих системах і формування нових типів поведінки є силою, що стимулює навчання та адаптацію агентів.

9. *Самоорганізація.* В АОМ завдяки циклам зворотного зв'язку може виникати самоорганізація агентів. Вони можуть утворювати такі структури, як підгрупи агентів або локальні мережі. В них члени популяції у певному сенсі є ближчими до одних індивідів соціально-економічного простору, ніж до інших. Ці структури взаємодії самі можуть ендогенно змінюватися у часі, оскільки агенти стратегічно вирішують з ким взаємодіяти, орієнтуючись на очікувану винагороду.

10. *Механізми ринкового відбору.* Агенти, як правило, проходять через механізм ринкового відбору. Критерії селекції можуть бути складними і багатовимірними [3].

3. Основні компоненти АОМ. Щоб побудувати модель, яка володітиме значущим набором характеристик, за допомогою відповідей на вказані запитання слід визначити такі компоненти структури моделі.

1. *Множину агентів, їхніх атрибутів та поведінок.* Якими мають бути агенти моделі? Хто приймає рішення в моделі? Які сутності володіють поведінкою? Яка інформація про агентів є виключно описовою (статичні атрибути)? Які атрибути агентів обчислюються ендогенно за допомогою моделі і оновлюються в агентах (динамічні атрибути)? Поведінка яких агентів є цікавою для нас? Які рішення приймають агенти? Як поведінка призводить до дій агентів? Які дії вибираються агентами?

2. *Сукупність відносин між агентами та методів взаємодії:* Як агенти взаємодіють між собою? З ким вони взаємодіють? Наскільки відкриті чи зосереджені агенти у своїх взаємодіях?

3. *Середовище агентів:* Що служить середовищем для агентів? Як агенти взаємодіють з середовищем? Чи є мобільність агента в просторі важливою характеристикою?

4. Поняття «агента» в АОМ. Оскільки універсального визначення поняття «агента» не існує, розглянемо детальніше його властивості в АОМ. Єдиною найбільш визначною характеристикою агента є його здатність діяти автономно, тобто діяти самостійно і без сторонніх втручань у відповідь на ситуації, з якими він стикається. Агенти наділені поведінкою, яка дозволяє їм приймати незалежні рішення. Як правило, агенти є активними і виконують дії, щоб досягнути своїх внутрішніх цілей, а також реактивно відповідають на дії інших агентів та середовища. В роботі [4] пропонується наділяти агента такими необхідними властивостями.

1. *Агент є самодостатнім, модульним та однозначно ідентифікованим індивідом.* Вимога модулярності означає обмеженість агента. Щось може бути частиною агента, не бути частиною агента, або бути спільним атрибутом кількох агентів. Агенти мають атрибути, які дозволяють розрізняти та розпізнавати їх.

2. *Агент є автономним та самокерованим.* Агент може незалежно функціонувати у середовищі та взаємодіяти з іншими агентами, хоча б в обмеженому діапазоні ситуацій, які представляють інтерес для моделі. Агент володіє поведінкою, яка співвідносить інформацію, отриману агентом, з його рішеннями та діями. Агент отримує інформацію шляхом взаємодії з іншими агентами та середовищем. Поведінка агента може визначатися будь-яким способом – від простих правил до таких абстрактних моделей, як нейронні мережі або генетичні програми, що поєднують входи та виходи агента за допомогою адаптивних механізмів.

3. *Стан агента змінюється в часі.* Як система характеризується станом, що складається з набору її змінних стану, так і агент володіє станом, в якому представлені ключові змінні, що відповідають поточній ситуації. Стан агента складається з множини або підмножини його атрибутів. Стан АОМ – це набір станів усіх її агентів та стан середовища. Поведінка агента залежить від його стану. Таким чином, чим більше можливих станів має агент, тим більше в нього варіантів поведінки. В агентно-орієнтованій симуляції єдиною інформацією, яка потрібна для запуску системи, є її стан.

4. *Агент є соціальним.* Агент динамічно взаємодіє з іншими агентами, що впливає на його поведінку. Агенти мають протоколи взаємодії з іншими агентами, наприклад, обмін повідомленнями, рух у просторі, здатність реагувати на середовище тощо. Агенти володіють здатністю впізнавати та розрізняти особливості інших агентів.

5. Цілі створення та застосування АОМ. Дослідники АОМ виділяють чотири основні цілі створення та застосування цього класу моделей [5].

1. *Емпіричне розуміння.* Якщо дослідник ставить за мету емпіричне розуміння, то він намагається знайти відповідь на таке запитання: Чому окремі масові закономірності виникають і зберігаються навіть за відсутності контролю згори? Прикладом таких закономірностей є торгові мережі, соціальні норми, овації. Дослідники АОМ шукають пояснення у повторюваності взаємодії агентів, що функціонують у специфічних середовищах.

2. *Нормативне розуміння.* Яким чином можна використовувати АОМ як лабораторію для знаходження гарних механізмів дій? Дослідники, що переслідують цю мету, намагаються оцінити, наскільки гарно запропонована схема дій в галузі соціальної політики, або для різних інституцій чи процесів, дозволяє досягнути суспільно бажаної роботи системи в динаміці. Приклади включають системи аукціонів, правила голосування та введення в дію законів. Основна ідея полягає у тому, щоб наповнити пляшку водою і перевірити, чи вона протікає. Агентно-орієнтований світ будується так, щоб зафіксувати найхарактерніші аспекти функціонування соціальної системи в рамках розробленого механізму.

Потім світ населяється агентами з власною мотивацією та здатністю до навчання, і спостерігається його розвиток у часі. Ключовим питанням є межі, в рамках яких результати отримані в цьому світі є ефективними, справедливими та впорядкованими, незважаючи на спроби окремих агентів отримати індивідуальні переваги шляхом стратегічної поведінки.

3. *Евристична.* Як дізнатися більше про фундаментальні причинні механізми в соціальних системах? Навіть якщо припущення, на основі яких моделюється система, досить прості, наслідки їх використання можуть бути зовсім не очевидними, якщо система складається з багатьох взаємодіючих агентів. Ефект взаємодії агентів часто є несподіваним, оскільки важко передбачити усі наслідки навіть найпростіших форм взаємодії. Наприклад, одна з ранніх АОМ – модель сегрегацій у місті, розроблена Томасом Шеллінгом [5] – показує, яким чином сегрегація за місцем проживання може виникнути через вибір індивідуальних агентів навіть тоді, коли вони діють повністю толерантно.

4. *Методологічний розвиток.* Як найкращим чином забезпечити дослідників АОМ методами та інструментами, необхідними для строгого дослідження соціальних систем за допомогою контрольованих обчислювальних експериментів, і вивчити сумісність теорій, породжених експериментально, з реальними даними? Дослідники АОМ розглядають багато способів досягнути цієї мети: від ретельного розгляду методологічних принципів до практичної розробки засобів програмування, візуалізації та емпіричної валідації.

6. Таксономія АОМ. У роботі [6] АОМ пропонується класифікувати за такими характеристиками.

1. *Природа досліджуваного об'єкта.* Під природою досліджуваного об'єкта автори розуміють загальні факти (спостережувані емпірично), які модель намагається пояснити. Наприклад, одні моделі вивчають якісну зміну економічних систем завдяки витратам на дослідження та розробки, а інші досліджують такі кількісні об'єкти, як статистично спостережувані властивості сукупного зростання, припустимо, автокореляційні принципи. Інша важлива відмінність існує між моделями, які намагаються пояснити одне явище (наприклад, сукупне зростання), і моделями, що вивчають множинні явища (наприклад, взаємна залежність сукупного зростання, продуктивності праці та інвестицій). Останні також можуть розглядатися в короткостроковому або довгостроковому періоді. Нарешті, АОМ можуть досліджувати мікророзподіли (наприклад, розмірів фірм) або макроагрегати (наприклад, часові ряди показників держави, або світової економіки).

2. *Мета аналізу.* Як правило, АОМ працюють у рамках вибірки, тобто їхня головна задача відтворити статистичні властивості даних минулого. Моделі, які намагаються відповісти на питання керування, зробити прогнози або виявити наслідки політики, зустрічаються рідше.

3. *Припущення моделювання.* Деякі моделі можуть містити багато ступенів свободи, а деякі – ні. Наприклад, правила прийняття рішень агентами в АОМ можуть характеризуватися багатьма змінними і параметрами. З іншого боку,

вони можуть описуватися дуже просто і коротко. Аналогічно, структура взаємодій може бути зафіксована ззовні, а може змінюватися з часом екзогенно або ендогенно. Тракткування часу і оновлення в одних моделях може бути дискретним і розривним, а в інших – паралельним та асинхронним. В залежності від правил прийняття рішень агентами АОМ поділяються на адаптивні або оптимізуючі та детерміністські або стохастичні.

4. *Метод аналізу чутливості.* Щоб ретельно оцінити властивості АОМ, слід провести детальний аналіз її чутливості. Цей аналіз повинен, щонайменше, дати відповідь на питання, яким чином результати залежать від (1) мікро-макро параметрів; (2) початкових умов, та (3) мінливості, викликані стохастичними елементами (наприклад, випадковими індивідуальними правилами прийняття рішень). В загальному, аналіз чутливості передбачає ретельне вивчення змін виходу моделі від збурень її входу. Таким чином, крім квантування простору параметрів та початкових умов, дослідники мають перевірити робустність результатів до змін в (1) розподілі випадкових величин, що генерують системний шум; (2) механізмі визначення часу та оновлення, і (3) рівня агрегування мікроекономічних змінних.

В роботі [7] АОМ пропонується класифікувати з точки зору емпіричної валідації, причому різницю між ними можна зрозуміти за допомогою характеристики цілі моделювання.

5. *Кейс-моделі* є моделями емпірично обмеженого явища зі специфікою та індивідуальністю в термінах просторово-часового виміру. Наприклад, дослідження ринку риби у французькому Марселі спрямоване на дуже детальне відтворення функціонування ринку таким чином, щоб повніше зрозуміти його характерні особливості.

Моделі *мінізації* вивчають специфічні класи емпіричних явищ і намагаються дослідити деякі теоретичні властивості, застосовні до більш або менш широкого діапазону емпіричних явищ. Наприклад, розробник може припустити, що деякі ринки риби належать до одного і того ж класу явищ, тобто, всі вони мають певні спільні риси, тоді побудована модель буде спрямована на виявлення спільних властивостей усіх ринків риби, що характеризують, припустимо, Французьку Рив'єру або Середземне море.

Теоретичні абстракції є «чистими» теоретичними моделями, не прив'язаними ні до конкретного емпіричного явища, ні до окремого класу емпіричних явищ. Наприклад, дослідник може ставити за мету розуміння характерних рис механізму «голландського» аукціону, що діє на більшості ринків риби. В цьому випадку, модель спрямована на вивчення цього інституту, щоб показати, наприклад, його ефективність в процесі швидкого розподілу цін та кількостей для швидкопсувних товарів, наприклад риби.

7. **Приклади АОМ обчислювальної економіки.** В роботі [8] наводиться опис агентно-орієнтованої мікро-макро моделі на базі моделі MOSES (Model of the Swedish Economic System). Початково, ця модель розроблялася з метою аналізу промислового розвитку, також передбачалася можливість відтворити

процес формування як макроекономічних показників, так і деяких розподілів показників для фірм. Перша версія цієї моделі була опублікована ще в 1977, і з того часу вона неперервно вдосконалюється та оновлюється.

Виробництво тут моделюється як на рівні окремої фірми, так і на секторному рівні, тоді як в інших моделях сектор є базовою одиницею. Виробничий сектор поділяється на чотири галузі промисловості (виробництво сировини, проміжних товарів, товарів тривалого користування та споживчих товарів). Кожна галузь виробляє гомогенний продукт. Всього в базовому році виробництвом займається 225 фірм, з яких 154 є реальними, а інші – синтетичними (для відповідності національним рахунками). На всіх ринках (товарів, праці та капіталу), фірми приймають рішення, які ґрунтуються на адаптивних очікуваннях. Ринки представлені явним чином, і транзакції відбуваються без ітерації рішень, отже, в загальному випадку ринки не врівноважуються. Фірми можуть мати невикористані потужності, небажані запаси та незаповнені вакансії. Пропозиція праці вважається заданою ззовні, безробіття допускається. Базовою одиницею часу є квартал. Фірми переглядають власні рішення, але інколи вони неспроможні уникнути втрат. Через конкуренцію, фірми можуть виходити з конкурентної боротьби і банкрутіти. Тим не менше, прибутковість промисловості призводить до появи нових фірм.

На агрегованому рівні, сектори взаємодіють за допомогою одинадцяти-секторної таблиці «витрати-випуск», яка змінюється через відносну вагу фірм та внутрішній технологічний процес. Однак, у виробничому секторі фірми здійснюють купівлю та продаж товарів у інших секторів самостійно. Домогосподарства представлені агрегованим домогосподарством із кейнсіанською функцією споживання та заощаджень. В моделі також присутній уряд, який збирає податки і здійснює витрати. Розглядається відкрита економіка. Ціни на іноземні товари та іноземна облікова ставка визначаються екзогенно. Нарешті, модель калібрується так, щоб відтворювати розвиток макроекономічних показників шведської економіки протягом періоду калібрування, 1982–1990. Це робиться для того, щоб забезпечити її внутрішню узгодженість. Результати симуляції використовуються для розуміння та аналізу причинних зв'язків між різними економічними змінними, але не для аналізу траєкторій розвитку реальної шведської економіки.

Модель EURACE [9] складається з капітального товару, споживчого товару та ринку праці. Капітальні товари доступні з необмеженою пропозицією за цінами, заданими ззовні. Якість капітальних товарів зростає з часом, причому технологічні зміни задаються за допомогою стохастичного процесу інновацій. Фірми з сектору споживчих товарів використовують капітальні товари і працю для виробництва товарів споживання. Ринок праці населений працівниками, які володіють скінченим числом загальних навичок різних рівнів та отримують специфічні робочі навички, які потрібні для повноцінного використання технологічних переваг капіталу, що бере участь у процесі виробництва. Споживчі товари продаються в торгових центрах, які грають роль не підприємств, орієнтованих на отримання прибутку, а локальних ринкових платформ, де фірми зберігають і продають свою продукцію, і куди споживачі приходять купувати товари за оголошеними цінами.

Таким чином, у моделі представлено два типи активних агентів та два типи пасивних агентів (пасивність тут означає те, що агенти цього типу не приймають жодних рішень). Кожен тип активного агента має кілька ролей, відповідно до своєї діяльності на різних ринках.

Економіка складається з двох регіонів, і кожний агент характеризується розташуванням в одному з них. Деякі дії відбуваються на локальному рівні (наприклад, споживання агентів), інші – глобально (наприклад, продаж капітальних товарів або пропозиція праці). Мінімальною одиницею часу є день, однак більшість взаємодій та рішень повторюються щомісячно.

Щоб максимально наблизити функціонування моделі до стандартних процедур менеджменту в реальному світі, поведінка фірм визначається відносно простими правилами прийняття рішень. Взагалі, фірма має змогу визначити потрібний обсяг виробництва, необхідну для цього кількість факторів виробництва, а також відповідну ціну на продукцію. З тих же міркувань, рішення споживачів щодо розподілу доступного бюджету між споживанням та заощадженням моделюється на основі простих, емпірично підтверджених правил, а рішення щодо вибору товарів споживання описується за допомогою моделей логістичної регресії, широко застосованих у емпіричних маркетингових дослідженнях.

За допомогою побудованої моделі автори намагаються проаналізувати ефект від заходів, спрямованих на покращення загальних навичок працівників.

Висновки. Агентно-орієнтований підхід – відносно нова парадигма моделювання, яка утворилася на перетині комп'ютерних наук та економіки. Основними складовими типової АОМ є агенти з визначеними атрибутами та поведінкою, топологія зв'язності цих агентів, а також середовище, в якому існують агенти. Характерними особливостями АОМ є гетерогенність, обмежена раціональність, здатність до навчання та погляд «знизу догори». Моделі цього класу створюються з різною метою: нормативною, емпіричною, евристичною чи методологічною. АОМ можна класифікувати за природою досліджуваного об'єкта, метою аналізу, припущеннями моделювання або методами аналізу чутливості.

Застосування АОМ дозволяє як виявити та формалізувати певні закономірності у динаміці економічних систем, так і моделювати їх очікувану поведінку. Таким чином, АОМ виступають як важливий сучасний інструмент підтримки прийняття та оптимізації відповідальних рішень на різних рівнях, а також прогнозування наслідків від прийняття тих чи інших альтернативних сценаріїв чи планів дій.

Д.А. Омелянчик

АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИКИ: ОСОБЕННОСТИ, ВИДЫ, ПРОБЛЕМЫ

Рассматриваются основные подходы к разработке агентно-ориентированных моделей вычислительной экономики. Определяются характерные черты и основные компоненты агентно-ориентированных моделей (АОМ). Рассматривается понятие «агент». Приводятся основные цели создания агентно-ориентированных моделей. Поясняются некоторые способы классификации АОМ. Приводится краткое описание моделей MOSES и EURACE.

D.A. Omelianchuk

AGENT-BASED ECONOMIC MODELLING: FEATURES, TYPES, PROBLEMS

The main approaches to agent-based models design are discussed. The characteristic features and basic component of agent-based models are defined. The notion of an «agent» is considered. The main purposes of agent-based models construction are given. Some possible classifications are explained. The brief review of MOSES and EURACE is presented.

1. *Каталевский Д.Ю.* Системная динамика и агентное моделирование: необходимость комбинированного подхода [WWW документ]. URL http://sysdynamics.ru/system/files/5/original/Katalevsky_article_agents_SD.pdf
2. *Tesfatsion L.* Agent-based computational economics: A constructive approach to economic, 2005 [WWW document]. URL <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/hbintl.pdf>
3. *Караев А.К., Мельничук М.В.* Агентно-ориентированные технологии дизайна экономической (фискальной, монетарной) и социальной политики: Монография. – М.: ВГНА Минфина России, 2011. – 274 с.
4. *Macal C.M., North J.M.* Tutorial on agent-based modeling and simulation // J. of Simulation. – 2010. – N 4. – P. 151 – 162.
5. *Tesfatsion L., Judd K.L.* Handbook of computational economics, Vol. 2: Agent-Based Computational economics. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 904 p.
6. *Windrum P., Fagiolo G., Moneta A.* Empirical validation of agent-based models: Alternatives and prospects // J. of Artificial Societies and Social Simulation. – 2007. – N 10(2). URL <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/10/2/8.html>
7. *Boero R., Squazzoni F.* Does empirical embeddedness matter? Methodological issues on agent-based models for analytical social science // J. of Artificial Societies and Social Simulation. – 2005. – N 8(4). URL <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/6.html>
8. *Ballot G., Taymaz E.* Technological change, learning and macro-economic coordination: An evolutionary mode // J. of Artificial Societies and Social Simulation. – 1999. – N 2(2). URL <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/2/2/3.html>
9. *Dawid H., Gemkow S., Harting P., Neugart M.* On the effects of skill upgrading in the presence of spatial labor market frictions: An agent-based analysis of spatial policy design // J. of Artificial Societies and Social Simulation. – 2009. – N 12 (4). URL <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/5.html>

Одержано 30.01.2013