

УДК 004.415.2:004.81

*А. О. Примостка, аспірант
ДВНЗ «Київський національний економічний
університет імені Вадима Гетьмана»*

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

*Prymostka Andrii
State higher education establishment
«Vadym Hetman National Economic University of Kyiv»
Graduate Student*

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF AGENT-ORIENTED MODELLING OF ECONOMIC PROCESSES

АНОТАЦІЯ. В статті систематизовано основні положення концепції агентно-орієнтованого моделювання (АОМ). Визначено мету, узагальнено та розкрито зміст методологічних принципів, на яких базується концепція АОМ. Розглянуто властивості економічних агентів. Досліджено процес еволюції агентно-орієнтованих моделей, узагальнено етапи їх побудови та реалізації, розкрито зміст кожного етапу, проаналізовано структурно-логічне наповнення моделей. За результатами дослідження виокремлено сильні та слабкі сторони АОМ, зроблено висновки щодо доцільності застосування цього підходу для дослідження складних економічних систем.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: концепція агентно-орієнтованого моделювання, властивості агентів, принципи, етапи, структура агентних моделей

ANNOTATION. The main principles of agent-oriented modelling (AOM) conception have been systematized in the article. The goal was defined; the content of the methodological principles, on which AOM concept's based, were summarized and revealed. The properties of economic agents were reviewed. The process of evolution of agent-oriented models was investigated; the stages of its construction and implementation were generalized; the content of each stage was revealed; the structural and logical content of models was analyzed. According to the results of the research, the strengths and weaknesses of agent-oriented modelling were distinguished; the conclusions regarding the expediency of implementation of this approach for the research of complex economic systems were made.

KEYWORDS: agent-oriented modelling conception, agent properties, principles, stages and structure agent-oriented models.

Постановка проблеми. В сучасних наукових дослідженнях економіко-математичне моделювання є одним з ефективних інструментів вирішення проблем, які виникають в складних економічних системах, де проведення експериментів з реальними об'єктами прак-

тично неможливе. З розвитком та ускладненням суспільних відносин виникає необхідність спрощення представлення складних систем та урахування в них можливих дій користувача. Ефективним способом вирішення цієї проблеми став агентно-орієнтований підхід до моделювання складних систем, який одним з видів імітаційного моделювання. Ключова ідея концепції агентно-орієнтованого моделювання (АОМ) полягає в припущенні, що прості правила поведінки окремих агентів генерують складну поведінку системи в цілому. Імітуючи одночасні операції та взаємодію багатьох агентів агентно-орієнтована модель дозволяє відтворити та передбачити появу складних явищ в економічній системі. Особливістю агентно-орієнтованого моделювання, яка відрізняє його від інших методів економіко-математичного моделювання, є те, що вирішення цих досить складних питань втілюється у відносно простій моделі окремого агента.

Агентно-орієнтоване моделювання є інноваційним напрямом наукових досліджень і успішно застосовується у багатьох наукових галузях, таких як біологія, екологія, фізика, соціологія. Цілком закономірно, що розвиток агентно-орієнтованого моделювання не міг не поширитися на економічну сферу. Як наслідок, в економічних науках сформувався окремий напрям наукових досліджень, який отримав назву «агентно-орієнтована обчислювальна економіка» (*Agent-based computational economics*). Цей напрям є альтернативою стандартним підходам до моделювання, що базуються на припущенні про існування ринкової рівноваги, досягти якої в сучасних реаліях практично неможливо. На противагу цьому, агентно-орієнтоване моделювання сконцентроване на вивченні міжособистісної та соціальної взаємодії агентів у динамічній перспективі. Переваги агентно-орієнтованого моделювання зумовили його поширення в дослідженнях економічних процесів та явищ, що й обумовлює актуальність пропонованої статті.

Аналіз останніх джерел та публікацій. Дослідженню концептуальних засад агентно-орієнтованого моделювання економічних процесів присвячено праці багатьох зарубіжних і вітчизняних науковців, таких як Г.Марковіц, Т. Кім, Дж.Холланд, Дж.Х. Міллер, М. Леві, Г.Леві, С. Соломон, Е.Зішанг, Т.Люкс, М. Марчезі, С. Чен, М. Грубер, А. Бахтизін, В. Гужва, М. Краснюк та інші [1-17]. Разом з тим, вивчення та узагальнення наукових розробок засвідчує, що парадигма агентно-орієнтованого моделювання знаходиться на етапі становлення, а тому потребує постійних наукових пошуків. Метою цього дослідження є система-

тизація та узагальнення основних концептуальних положень агентно-орієнтованого моделювання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Метою агентно-орієнтованого моделювання є виявлення та пояснення агрегованих закономірностей (узагальнених властивостей) економічної системи, які виникають з повторюваної взаємодії між автономними гетерогенними агентами. В контексті АОМ, під економічними агентами розуміють сутності (об'єкти, неподільні одиниці), які працюють, взаємодіють, розвиваються, навчаються, створюють цінності та обмінюються ними [7, 8, 9]. Економічні агенти мають властивості автономності, інтерактивності, гетерогенності, здатності розвиватися. Дослідження, які проводяться в рамках АОМ, базуються на використанні комп'ютерних систем для вивчення процесів розвитку та функціонування децентралізованих економічних ринків у межах контрольованих експериментальних умов. Інструментарій АОМ дозволяє представити складні економічні системи через прості правила поведінки окремих агентів. Агентно-орієнтовані моделі використовуються для побудови штучних економічних систем за допомогою комп'ютерної симуляції.

Погляди вчених на процес еволюції АОМ дещо розходяться. Деякі вчені вважають агентно-орієнтоване моделювання новим напрямом, інші стверджують, що воно має глибоку історію і бере початок ще з теоретичної машини фон Неймана [7, с.118-128; с.356-357]. Виконуючи детальний покроковий алгоритм, машина фон Неймана могла створити свою точну копію, а отже, мала здатність до самовідтворення. Розвиток цього напрямку та вдосконалення моделей привело до створення так званих клітинних автоматів. Згодом друг фон Неймана — Станіслав Улам запропонував відтворювати машину на папері як набір клітинок, що і поклато початок розвитку клітинних автоматів. Найбільш відомою реалізацією клітинного автомата стала гра «Життя», запропонована Джоном Хортоном Конвеем (*John Horton Conway*), що відрізняється від машини фон Неймана достатньо простими правилами поведінки агентів [10, с. 25]

Однією з перших моделей, побудованих на базі концепції агентно-орієнтованого моделювання, була модель сегрегації Томаса Шеллінга (1971 р.). Хоча Т.Шеллінг спочатку використовував не комп'ютери, а проводив імітацію за допомогою монет і графів, зображених на папері, його підхід втілює основні положення концепції агентно-орієнтованого моделювання, як сукупності автономних агентів, що взаємодіють у загальному зовнішньому середовищі із глобальними

параметрами, які можна спостерігати. В 1980-х роках основні положення АОМ отримали розвиток в працях Роберта Аксельрода, який в межах агентно-орієнтованої концепції розробив модель турніру економічних агентських стратегій, в якій взаємодія агентів обмежувалася для визначення переможця. В подальшому Р. Аксельрод звернувся до розробки багатьох інших моделей на базі концепції агентів в сфері політології [11, 15]. Однією з перших агентно-орієнтованих моделей, які імітували поведінку біологічних систем і містили соціальні характеристики, стала робота Крейга Рейнольдса, в якій він побудував моделі зграй. Це була спроба моделювати реальність живих біологічних агентів, відому як модель «Штучне життя» («Artificial life»).

Період 1990-х років був досить продуктивним для розвитку АОМ [1-5]. В цей час відбулося розширення сфери застосування АОМ в галузь соціальних наук. Найбільш відомим досягненням стало створення масштабної агентно-орієнтованої моделі — так званої моделі Сахана (Sugarcape), розробленої Джошуа М. Епштейном і Робертом Акстелом для моделювання і дослідження таких соціальних явищ, як сезонні міграції, забруднення навколишнього середовища, статеве розмноження, війна, передача хвороб і навіть розвиток культури [12]. Серед інших помітних розробок цих років — агентно-орієнтована модель для вивчення спільної еволюції соціальних мереж і культури. В цей час вийшов друком перший підручник з соціального моделювання: «Моделювання для соціолога» (1999). Автор підручника, Найджел Гілберт, також заснував журнал АОМ в галузі соціальних наук: «Журнал штучних товариств та соціального моделювання». Наукові розробки щодо АОМ в будь-яких сферах діяльності публікувалися в журналі «Складні адаптивні системи моделювання» [13].

В 2000-х роках пошуки в сфері агентно-орієнтованого моделювання продовжилися. Так, у 2006 році Рон Сан побудував модель когнітивної соціальної симуляції, використавши розроблені ним методи, які на базі моделей людського пізнання будують агентно-орієнтовану симуляцію культури [14]. З удосконаленням програмного забезпечення та зростанням потужності обчислювальної техніки, отримали розвиток комп'ютерні симуляції ринків з індивідуальними адаптивними агентами.

Концепція агентно-орієнтованого моделювання ґрунтується на певних принципах. В основу концепції агентно-орієнтованого моделювання покладено принцип децентралізованого прийняття рішень багатьма автономними агентами та зростання внаслідок цього непе-

редбачуваності поведінки системи на макрорівні, яка формується під впливом дій на мікрорівні. Але вирішення цих досить складних питань втілюється у відносно простих моделях окремих агентів, сукупність яких у процесі взаємодії формують цільову модель економічної системи. Тому моделювання індивідуальної поведінки агентів та їх взаємодії дозволяє прогнозувати результат поведінки системи в цілому. Таким чином, глобальна поведінка системи виникає як результат діяльності багатьох агентів, кожен з яких слідує своїм власним правилам, живе в загальному середовищі, взаємодіє з середовищем і з іншими агентами. Відтак, моделювання відбувається на мікрорівні і є процесом появи з нижчого (мікро) рівня сукупної поведінки системи на вищому (макро) рівні. Отже, агентно-орієнтоване економікоматематичне моделювання спрямоване на дослідження економічних явищ та процесів за допомогою обчислювальних процедур і моделей, які утворюють сукупність автономних інтерактивних агентів, здатних до розвитку та навчання, і є методом моделювання знизу вгору.

Процес виникнення нових властивостей системи належить до тих явищ, в яких ціле не може розглядатися як проста сума його частин. Іншими словами, індивідуальної поведінки агентів самої по собі недостатньо, щоб повністю передбачити результат поведінки системи в цілому. Отже, необхідно зрозуміти, як агенти взаємодіють між собою, щоб поєднати мікро- так макро- рівні у процесі моделювання. Типовим прикладом є відома модель міської сегрегації, розроблена Т.Шеллінгом як продовження досліджень на базі першої моделі сегрегації, яку він побудував в 1971р. В моделі міської сегрегації помірні індивідуальні побажання жити з сусідами тієї ж етнічної групи приводять до того, що агенти поступово розділяються на окремі громади, які повністю складаються з агентів одного типу.

З іншого боку, сукупний результат поведінки системи може викликати зміни в індивідуальній поведінці агентів, тобто між агентом та системою існує двосторонній (як прямий, так і зворотній) зв'язок. Цей зв'язок характеризується як динамічний, оскільки спочатку формулюються гіпотези про поведінку агентів та їх взаємодію з іншими агентами, а потім у процесі моделювання створюється історія агентів, що відображає наслідки від використання цих гіпотез. Таким чином, поведінка агентів та їх взаємодія залежить від їхнього минулого досвіду і у багатьох агентно-орієнтованих моделях агенти змінюють свою поведінку, опираючись на минулий досвід. Такий принцип поведінки агентів створює залежність від пройденого шляху, тобто вла-

стивості, яка характеризує гетерогенність агентів. Дійсно, навіть якщо властивості двох агентів на початку симуляції були ідентичними, то в процесі роботи агенти обирають різні стратегії поведінки, вибудовуючи власну траєкторію розвитку. Таким чином, з часом агенти будуть відрізнятися один від одного все більше і більше. Отже, агентно-орієнтовані моделі базуються на принципах децентралізованого прийняття рішень багатьма автономними агентами та зростання внаслідок цього непередбачуваності поведінки системи на макрорівні, яка формується під впливом дій на мікрорівні. Сучасні дослідження в сфері АОМ спрямовані на формування інструментарію моделювання дійсно децентралізованого процесу прийняття рішень [5, 6, 17]. Узагальнюючи сказане, до основних принципів агентно-орієнтованого моделювання слід віднести: децентралізоване прийняття управлінських рішень, переважання індукції над дедукцією, динамізм, історизм, принципи неадитивності, гетерогенності, інтеграції.

Процес розробки та реалізації агентно-орієнтованої моделі складається з кількох етапів (табл. 1).

Щодо структурного наповнення агентно-орієнтованих моделей, то більшість з них на базовому рівні має ідентичну структуру, хоча і з деякими варіаціями. Маючи популяцію агентів, розташованих у заздалегідь сформованому середовищі та їх соціальний контекст, основним компонентом моделі є процес прийняття рішень цими агентами. Як правило, рішення агентів торкаються можливого обміну чи взаємодії з іншими агентами, та можуть включати як вибір дії (наприклад, кількість товару для придбання або продажу), так і вибір партнера (наприклад, продавець для покупця, чи покупець до продавця). У інших випадках, навпаки, партнери (покупці та продавці) вибираються випадково за допомогою комп'ютера [14, 15, 16]. Залежно від проблеми, яка вивчається, модель може представляти не тільки обмін товарами чи послугами, але й спілкування, обмін інформацією, пошук порад та інші когнітивні чи соціальні процеси.

Індивідуальний процес прийняття рішень агентами та їхньої наступної взаємодії повторюється декілька разів. На кожному кроці минулі рішення та дії формують нові рішення. В деяких моделях агенти поступово змінюють свою поведінку на основі результатів минулих рішень та змін у зовнішньому середовищі. Соціальний контекст в моделі може приймати різні форми. Наприклад, агенти можуть взаємодіяти з будь-якими іншими агентами або лише з обраною групою, визначеною як просторова група сусідів (група з обмеженням на зв'язки). З часом така група може змінювати розмір та

склад у результаті дій агентів. Набір варіантів рішень, з-поміж яких агент обирає індивідуальне, можна або задавати наперед, або формувати поступово в результаті отримання та накопичення інформації агентом. Правила вибору варіанту рішення варіюються від правил у формі стратегії чи раціональної поведінки до деякого задовільного критерію або навіть до випадкового вибору. Це дозволяє проявлятися відмінностям у поведінці агентів в межах однієї популяції залежно від їхніх індивідуальних властивостей.

Таблиця 1

ЕТАПИ ПОБУДОВИ АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ЇХ ЗМІСТ

Етапи	Зміст етапу
Перший	формулювання мети, яку необхідно досягти в процесі моделювання, та здійснення концептуальної постановки задачі
Другий	визначення основних економічних агентів на основі логічних методів досліджень, а також опис їх характеристик, властивостей та функцій
Третій	ідентифікація та опис взаємозв'язків між економічними агентами, а також виявлення характеру взаємодії агентів між собою та із зовнішнім середовищем; формалізація поведінки агентів та характеру їх взаємозв'язків
Четвертий	формалізоване представлення агентно-орієнтованої моделі як концептуально єдиного комплексу та вибір адекватного технологічного способу її кількісної реалізації. Для цього можуть бути використано як стандартні програмні засоби, так і (за необхідності) розроблено спеціальне програмне забезпечення; пошук платформи для АОМ і розробка стратегії реалізації моделі
П'ятий	кількісна реалізація моделі, її налаштування та адаптація до реальної ситуації
Шостий	обираються значення параметрів моделі та очікуваний рівень точності, які відповідають емпіричним спостереженням або спираються на раціональні судження
Сьомий	запуск моделі та аналіз вихідних даних щодо зв'язку між поведінкою агентів на мікрорівні та поведінкою всієї системи в цілому. В разі значних відхилень від реальних спостережень за поведінкою економічної системи проводиться коригування та модернізація як окремих агентів, так і моделі в цілому
Восьмий	хоча й необов'язковий, але майже завжди виконується. На цьому етапі, за необхідності, для досягнення більшої точності, коригуються ті параметри моделі, які не адекватні економічним показникам або не можуть бути оцінені. Також можуть бути внесені зміни до формальної частини моделі, якщо результати моделювання показали невідповідність емпіричним фактам (реальним показникам)

Усі структурні елементи моделі, включаючи властивості агентів та початковий стан системи, задаються у рамках ініціалізації (на початку реалізації моделі). Також потрібно визначити показники, які характеризують властивості агентів та/або системи в цілому і є предметом вивчення та прогнозування, наприклад шаблони цін та обсяги трансакцій у моделях фінансових ринків. Технічно існує багато можливостей для задавання різних параметрів моделі. Наприклад, час може бути неперервним або дискретним, процеси прийняття рішень можуть бути одночасними чи послідовними, взаємодія агентів може бути двосторонньою або багатосторонньою.

Потім агенти починають взаємодіяти протягом деякого часу без зовнішнього втручання, зазвичай до моменту, поки система не досягне стабільного стану. Результатом комп'ютерної симуляції є прогнозні значення показників, які характеризують стан системи, що вивчається. Симуляцію можна повторювати для різних значень вхідних параметрів та початкових умов з тим, щоб вивчити як точно налаштувати модель для досягнення цільових результатів. Цей підхід, що обмежує втручання у модель визначенням початкової точки та правилами взаємодії агентів, називають методом моделювання «знизу-вгору», оскільки результат залежить лише від поведінки агентів без нав'язування умов рівноваги (рівноважних цін, раціональних очікувань тощо) ззовні (метод «зверху-вниз»).

Агентно-орієнтоване моделювання, як й будь-який метод пізнання, має як сильні, так і слабкі сторони. Концепція АОМ є альтернативою стандартним підходам до моделювання з використанням припущення про ринкову рівновагу, які стають неадекватними, коли рівноваги немає. Перевага АОМ полягає тому, що воно сконцентроване на вивченні міжособистісної та соціальної взаємодії агентів у динамічній перспективі. Оскільки, спираючись на функцію корисності, досить складно отримати узагальнені властивості системи з індивідуальної поведінки «репрезентативного агента», альтернативним рішенням стає АОМ. Усвідомлення потенційних переваг, які надає агентно-орієнтоване моделювання, сприяло його розповсюдженню серед широкого кола науковців та практиків [17].

До сторін, які ускладнюють процес моделювання, слід віднести значну кількість аспектів моделювання, що включає обмеження дій, параметрів та детальні правила поведінки агентів. Досить

складним є визначення діапазону можливих опцій (дій агента) моделі. Цей діапазон може бути дуже широким, що зумовлено виключенням з моделі стандартних припущень щодо раціональності агентів та рівноваги системи. З позицій не Вальрасівського аналізу та з агентами, які можуть і не мати властивості повністю раціональних, моделювання мікроекономічної поведінки суттєво ускладнюється, і це основна практична задача, що потребує подальших досліджень [17]. Слід визнати, що комп'ютерне моделювання не дає доказів у строгому розумінні, а лише дозволяє робити індукційні обґрунтування. Симуляцію можна розглядати у вигляді «чорного ящика», у якому задаються входи (характеристики агентів, початкові умови, правила взаємодії) та спостерігаються виходи (показники), але при цьому не має повного розуміння внутрішнього механізму роботи системи.

Висновки з проведеного дослідження. Агентно-орієнтоване моделювання є інноваційним напрямом наукових досліджень і успішно застосовується в різних галузях науки, в т.ч. в економіці. В концепції АОЕ в центрі уваги перебуває питання отримання, накопичення та використання інформації на індивідуальному рівні, а також поширення інформації на рівні системи в цілому. У агентів, що рухаються від їх персонального досвіду до більш широких узагальнень завдяки процесу навчання, а не завдяки отриманню висновків із заданих припущень, індукція переважає над дедукцією. Моделювання дає змогу визначити достатні, але не необхідні умови для виникнення бажаного явища. У цьому сенсі агентно-орієнтоване моделювання в економічній сфері більш схоже на інженерні та експериментальні науки, ніж на дедуктивну логіку чи математику. Інструментарій АОМ дозволяє представити складні економічні системи через прості правила поведінки окремих агентів. В світовій науці розроблено низку агентно-орієнтованих моделей різного рівня складності. Ці моделі використовуються для побудови штучних ринків за допомогою комп'ютерної симуляції.

Література

1. *Kim G. W. and Markowitz H. M.* Investment rules, margin and market volatility. — *Journal of Portfolio Management*, №16: 45–52, 1989
2. *Levy M., Levy H. and Solomon S.* A microscopic model of the stock market: cycles, booms, and crashes. — *Economics Letters*, № 45: 103–111, 1994

3. *Levy M, Levy .H and Solomon S.* Microscopic simulation of the stock market: the effect of microscopic diversity. — *Journal Physique*, I 5: 1087–107, 1995
4. *Holland, J.H.; Miller, J.H.* Artificial Adaptive Agents in Economic Theory. *American Economic Review*. № 81 (2): 365–71. 1991
5. *Lux T. and Marchesi M.* Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market. — *Nature*, 397 498–500, 1999
6. *Samanidou E., Zschischang E , Stauffer D. and Lux T.* Agent-based models of financial markets. *Samanidou et al 2007 Rep. Prog. Phys.* 70 409 doi:10.1088/0034-4885/70/3/R03 Режим доступу: <http://pmc.polytechnique.fr/pagesperso/dg/offer/market2.pdf>
7. *Гужва В.М.* Мультиагентні системи в економіці: суть, елементи реалізації та переваги від використання // *Економіка та підприємництво*: 36. наук. праць — К. КНЕУ, 2006, №17 — С. 214-223.
8. Інформаційні системи в економіці: монографія// за заг. ред. д-ра екон. наук, проф. С.В.Устенка. — К.: КНЕУ, 2012. — 425с.
9. *Ситник В.Ф., Краснюк М.Т.* Інтелектуальний аналіз даних (дейтамайнінг): Навч. посіб. — К.: КНЕУ, 2007. — 376с.
10. *Бахтизин А.Р.* Агент-ориентированные модели экономики. / А.Р. Бахтизин — М.: ЗАО Издательство «Экономика», 2008 — 279с.
11. *Axelrod, Robert.* The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration. Princeton: Princeton University Press. 1997
12. *Epstein, Joshua M.; Axtell, Robert* Growing artificial societies: social science from the bottom up. Brookings Institution Press. p. 224. ISBN 978-0-262-55025-3. October 11, 1996.
13. Springer Complex Adaptive Systems Modeling Journal (CASM). Режим доступу <http://www.casmodeling.com>
14. *Sun Ron.* Cognition and Multi-Agent Interaction: From Cognitive Modeling to Social Simulation. Cambridge University Press. 2006. ISBN 0-521-83964-5.
15. *Axelrod, R.* Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences, in Rennard J.P. (ed.), *Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economics and Management*, Hersey, PA, Idea Group. 2007.
16. *Матвійчук А.В.* Штучний інтелект в економіці: нейронні мережі, нечітка логіка : монографія / А.В. Матвійчук — К.: КНЕУ, 2011. — 439с.
17. *Tubaro P.* Is Individual Rationality Essential to Market Price Formation. The Contribution of Zero-Intelligence Agent Trading Models, *Journal of Economic Methodology*, 2009. №16, pp. 1-19.

References

1. Kim G. W. and Markowitz H. M. Investment rules, margin and market volatility. — *Journal of Portfolio Management*, № 16: 45–52, 1989.

