

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ: АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТРАЕКТОРИИ

© 2015 КОНОНОВА Е. Ю., КОВПАК Э. А., СУХОМЛИН П. В.

УДК 330.4:519.25

**Кононова Е. Ю., Ковпак Э. А., Сухомлин П. В. Мультиагентная модель экономической эволюции:
анализ чувствительности траектории**

На основе постулатов эволюционной экономики сформулированы гипотезы модели взаимодействия экономических агентов, которые формализованы следующим набором допущений: выпуск агентов описывается производственными функциями Кобба – Дугласа; инноваторами могут стать только располагающие достаточными для инвестирования средствами экономические агенты; агенты взаимодействуют, покупают и продают технологии; агенты, не располагающие достаточным для функционирования капиталом, перестают существовать; успешные экономические агенты могут «породить потомка» и передать ему технологию и факторы производства. На основе перечисленных допущений в программной среде NetLogo разработана мультиагентная модель экономической эволюции. С моделью проведена серия экспериментов с целью анализа чувствительности траекторий совокупного выпуска агентов к изменению экзогенных параметров: начального количества агентов, цены технологии, верхней границы капитала, достигаемая которую, агент способен стать инноватором или «породить потомка», и нижней границы капитала, переходя которую, агент прекращает существование. Сделаны выводы относительно порождаемых моделью режимов экономической эволюции. Определен вид функциональной зависимости между средней величиной абсолютного прироста совокупного выпуска и значениями экзогенных параметров модели. Практическая значимость построенной эволюционной модели взаимодействия экономических агентов состоит в возможности анализа влияния параметров технологического развития на характер и темпы макроэкономической динамики.

Ключевые слова: мультиагентная модель, экономическая эволюция, диффузия инноваций, траектория выпуска.

Рис.: 7. **Табл.:** 3. **Формул.:** 7. **Библ.:** 12.

Кононова Екатерина Юрьевна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономической кибернетики и прикладной экономики, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина (пл. Свободы, 4, Харьков, 61022, Украина)

E-mail: kateryna.kononova@gmail.com

Ковпак Эльвира Александровна – кандидат экономических наук, доцент, кафедра экономической кибернетики и прикладной экономики, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина (пл. Свободы, 4, Харьков, 61022, Украина)

E-mail: kovpak.elvira@gmail.com

Сухомлин Петр Владиславович – магистрант, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина (пл. Свободы, 4, Харьков, 61022, Украина)

E-mail: petsukhomlin@mail.ru

УДК 330.4:519.25

Кононова К. Ю., Ковпак Е. О., Сухомлин П. В. Мультиагентная модель экономической эволюции: анализ чувствительности траекторий

На основі постулатів еволюційної економіки сформульовано гіпотези моделі взаємодії економічних агентів, які формалізовано таким набором припущень: випуск агентів описується виробничими функціями Кобба – Дугласа; інноваторами можуть стати тільки економічні агенти, які володіють достатніми для інвестування засобами; агенти взаємодіють, купують і продають технології; агенти, які не володіють достатнім для функціонування капіталом, занепадають; успішні економічні агенти можуть «породити нащадка» та передати йому технологію і фактори виробництва. На основі перерахованих допущень у програмному середовищі NetLogo розроблено мультиагентну модель економічної еволюції. З моделлю проведено серію експериментів з метою аналізу чутливості траекторій сукупного випуску агентів до зміни екзогенних параметрів: початкової кількості агентів, ціни технології, верхньої межі капіталу, досягаючи яку, агент здатний стати новатором або «породити нащадка», і нижньої межі капіталу, переходячи яку, агент занепадає. Зроблено висновки щодо породжуваних моделлю режимів економічної еволюції. Визначено вид функціональної залежності між середньою величиною абсолютного приросту сукупного випуску і значеннями екзогенних параметрів моделі. Практична значимість побудованої еволюційної моделі взаємодії економічних агентів полягає в можливості аналізу впливу параметрів технологічного розвитку на характер і темпи макроекономічної динаміки.

Ключові слова: мультиагентна модель, економічна еволюція, дифузія інновацій, траекторія випуску.

Рис.: 7. **Табл.:** 3. **Формул.:** 7. **Бібл.:** 12.

Кононова Катерина Юрїєвна – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри економічної кибернетики та прикладної економіки, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (пл. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна)

E-mail: kateryna.kononova@gmail.com

Ковпак Ельвіра Олександрівна – кандидат економічних наук, доцент, кафедра економічної кибернетики та прикладної економіки, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (пл. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна)

E-mail: kovpak.elvira@gmail.com

Сухомлин Петро Владиславович – магистрант, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (пл. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна)

E-mail: petsukhomlin@mail.ru

UDC 330.4:519.25

Kononova K. Yu., Kovpak E. O., Sukhomlyn P. V. Multiagent Model of Economic Evolution: Analysis of Sensitivity of Trajectory

On the basis of the postulates of evolutionary economics, hypotheses of model of economic agents interaction have been formulated, which are formalized by the following set of assumptions: release of agents is described with the Cobb-Douglas production functions; only the economic agents with sufficient investment means may become innovators; agents interact, buy and sell technologies; agents that do not have sufficient amount of capital, pass away; successful economic agents can «spawn a child» and allocate it to the technology and production factors. Based on the listed assumptions, a multiagent model of economic evolution has been developed in the NetLogo software environment. A series of experiments with the model were carried out to analyze the sensitivity of trajectories of total release of agents to the changes in exogenous variables: the initial number of agents, prices of technology, upper limit of capital, with reaching of which agent will be capable of becoming an innovator or «spawn a child», and lower limit of capital, with reaching of which agent passes away. Conclusions about the generated model modes of economic evolution have been drawn. Type of functional dependency between the average value of the absolute growth of aggregate release and values of exogenous parameters of the model has been determined. Practical significance of the constructed evolutionary model of interaction of economic agents is represented by the possibility to analyze the impact of technological development on the nature and pace of macroeconomic dynamics.

Key words: multiagent model, economic evolution, diffusion of innovations, trajectory of release.

Fig.: 7. **Tabl.:** 3. **Formulae:** 7. **Bibl.:** 12.

Kononova Kateryna Yu. – Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Associate Professor, Department of Economic Cybernetics and Applied Economics, V. N. Karazin Kharkiv National University (pl. Svobody, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine)

E-mail: kateryna.kononova@gmail.com

Kovpak Elvira O. – Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Department of Economic Cybernetics and Applied Economics, V. N. Karazin Kharkiv National University (pl. Svobody, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine)

E-mail: kovpak.elvira@gmail.com

Sukhomlyn Petro V. – Graduate Student, V. N. Karazin Kharkiv National University (pl. Svobody, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine)

E-mail: petsukhomlin@mail.ru

Изменение структуры производства и занятости, появление новых отраслей экономики и формирование соответствующей методологии исследования происходящих в экономике изменений (а также особенностей их отображения в статистике) актуализируют необходимость обновления теоретического инструментария, способного адекватно описать наблюдаемые процессы.

В основе доминирующей теории, задающей рамки большинства экономических исследований на протяжении последней сотни лет, лежит предположение об оптимизаторском поведении экономических агентов. Оптимизация (как основной способ описания экономического поведения) и равновесный анализ (как основной метод исследования экономической динамики) составляют базис современного мейнстрима. Эти положения подвергались критике на протяжении всего XX века. С мировым кризисом нового тысячелетия дискуссии об адекватности основ экономической теории обострились с новой силой, методологические проблемы совокупности течений, относящихся к мейнстриму, сейчас обсуждаются широким кругом специалистов (не только экономистов, но и политиков, социологов, общественных деятелей). Критике тех или иных положений мейнстрима посвящено множество статей ведущих экономистов мира: Д. Канемана, А. Тверски, Дж. Акерлофа, М. Блауга, А. Сена, Дж. Стиглица, В. Полтеровича и др.

Представляется, что адекватный ответ на вызовы современного кризиса экономической теории (как на микро-, так и на макроуровне) позволит дать эволюционную парадигму, стремительно набирающая популярность среди экономистов. В ее развитие большой вклад внесли А. Алчиан, В. Баумоль, Т. Веблен, Д. Доси, П. Дэвид, Д. Коммонс, Д. Марч, К. Менгер, Д. Меткалф, Л. Мизес, Р. Нельсон, Э. Пенроуз, П. Савиотти, Р. Сайерт, Г. Саймон, О. Уильямсон, С. Уинтер, Д. Ходжсон, Й. Шумпетер, Ф. Хайек.

Для нашего исследования воспользуемся инструментарием шумпетерианской школы, в рамках которой предложена концепция повторяющихся структурных сдвигов («штормы созидательного разрушения»), за которыми следуют волны развития и быстрого роста. Штормы созидательного разрушения возникают благодаря предпринимателям-новаторам, которые внедряют новые продуктовые и торговые комбинации для того, чтобы извлечь прибыль за счет временного монопольного положения [1]. По мнению Нельсона и Уинтера, развитие наиболее конкурентоспособных хозяйствующих субъектов происходит за счет вытеснения из экономического пространства других членов популяции. Процесс экономического естественного отбора формирует определенный «организационный генотип» – свойства и характеристики хозяйствующих субъектов, позволяющие им выживать и развиваться в меняющихся условиях внешней среды, и рутины – стандартизированные правила принятия решений и осуществления деятельности [2]. Согласно эволюционистам-шумпетерианцам, во взаимодействии процедур поиска инноваций с механизмами «естественного отбора» происходит формирование траектории технико-экономического развития,

а характер выживания и роста популяции хозяйствующих субъектов в условиях изменяющейся среды определяет динамику макроэкономических показателей [2].

Следуя идеям эволюционистов, в рамках нашего исследования под экономическим геномом будем понимать совокупность технологий (организационных, технических и пр.), используемых агентом. При этом, как и в биологии, где ген определен не как некая жесткая структура, а как единица, созданная для удобства – участок хромосомы, самокопирующийся с достаточной точностью, чтобы служить жизнеспособной единицей естественного отбора [3], единицу экономического генома выделить достаточно сложно, отдельным геном можно считать как одну технологию (аналогия между научным прогрессом и генетической эволюцией с помощью естественного отбора подробно рассматривается в работах К. Поппера), так и их совокупность (например, производственных и организационных). Следуя принципам постсинтетической теории эволюции, а также вектору исследований, заданному в работах экономистов-эволюционистов – Й. Шумпетера [1], Р. Нельсона и С. Уинтера [2], В. Маевского [4], сформулируем следующий набор гипотез эволюционной модели взаимодействия экономических агентов:

1. *Гипотеза изменчивости*: основным источником изменчивости являются инновации, трансформирующие технологию экономического агента.

2. *Гипотеза адаптационизма*: доминирующими в экономической эволюции являются нейтральные процессы (рутины, стереотипы поведения) и очищающий отбор (банкротство). Положительный отбор (направленный на извлечение прибыли) является важным, но не первостепенным фактором экономической эволюции.

3. *Гипотеза прогресса*: развитие рассматривается как результат взаимодействия экономических агентов, разнообразие которых обусловлено их геномами, осведомленность и рациональность ограничены.

4. *Гипотеза антиградуализма*: экономическая эволюция происходит не столько путем накопления бесконечно малых изменений, сколько за счет внедрения крупных инноваций, влекущих шумпетерианские «штормы созидательного разрушения», смену технологических укладов (С. Глазьев), макрогенераций (В. Маевский [4]).

5. *Гипотеза слабого униформизма*: эволюционные процессы не изменяются по существу на протяжении обозримой истории. При этом, эволюционный процесс – это динамический, исторический процесс, макроэкономические характеристики которого являются следствием поведения агентов на микроэкономическом уровне.

6. *Гипотеза структуры*: эволюционный процесс может быть описан на основе сетевой структуры взаимодействия экономических агентов.

Цель настоящего исследования – на основе выдвинутых гипотез о протекании эволюционных процессов в экономике построить модель взаимодействия экономических агентов и, проанализировав чувствительность траекторий совокупного выпуска к вариации параметров модели, описать порождаемые ею типы развития системы.

Сформулируем следующие допущения модели взаимодействия экономических агентов:

а) Агенты описываются своими производственными функциями (ПФ). Такое предположение делалось в моделях многих эволюционистов (например, Сильверберга [5], Квасницкого [6], Вега-Редондо, тех же Нельсона и Уинтера), т. к. позволяет формализовать учет технологического фактора.

б) На основе гипотезы изменчивости сформулируем следующие допущения:

- ✦ согласно Й. Шумпетеру [1] источником инноваций и технологического роста является деятельность предпринимателей, которые имеют ресурсы для инвестирования в фундаментальные и прикладные научные исследования (по его оценкам, доля инноваторов не превышает 1% от общего числа экономических агентов). Предприниматели-инноваторы тратят часть своего капитала на НИОКР, доля этих затрат колеблется от 0,02% до 5% [7];
- ✦ технологический параметр агентов-новаторов подвержен случайным мутациям, вариативность которых пропорциональна вложениям. При этом изменения могут быть как в лучшую, так и в худшую сторону.

в) На основе гипотезы адаптации сформулируем допущения относительно фиксации полезных изменений (если случайная мутация увеличивает приспособленность, она будет распространяться с большей вероятностью [8]) и элиминации вредных:

- ✦ успешный экономический агент может породить потомка;
- ✦ предок передает потомку технологию и часть факторов производства;
- ✦ агент имеет возможность приобрести и использовать технологию одного из соседей в соответствии со следующими правилами:
 - стоимость технологии пропорциональна технологическому разрыву между покупателем и продавцом;
 - при покупке технологии наследуется только технологический параметр продавца;
- ✦ агенты, чей капитал достиг нижнего порогового значения, вымирают.

г) На основе гипотезы прогресса сформулируем допущения относительно ограниченных осведомленности и рациональности экономических агентов:

- ✦ осведомленность агентов ограничена радиусом взаимодействия – числом агентов, о которых данный агент располагает информацией;
- ✦ рациональность агентов ограничена отличиями от единицы вероятностями решения о покупке лучшей (по сравнению с собственной) технологии.

д) На основе гипотезы униформизма сформулируем предположение о неизменности характера взаимодействия между агентами в процессе моделирования.

е) На основе гипотезы структуры предположим, что радиус взаимодействия между агентами растет по мере технологического прогресса агента, а сам агент таким образом обрастает сетью связей.

Формализуем предположения модели следующим образом:

- ✦ в качестве ПФ агента будем использовать линейно-однородную ПФ Кобба – Дугласа такого вида:

$$Y = AK^\alpha L^{1-\alpha}, \quad (1)$$

где Y – продукт агента; K – капитал агента; L – трудовые ресурсы агента; α – коэффициент эластичности капитала; A – технологический коэффициент;

- ✦ инноваторами могут стать только крупные экономические агенты, располагающие достаточными для инвестирования средствами:

$$K_i \geq K_{\max}, \quad (2)$$

где K_{\max} – пороговое значение капитала (экзогенно задаваемый параметр);

- ✦ технологический коэффициент инноваторов – случайная величина, распределенная по нормальному закону со средним, равным текущему значению и стандартным отклонением, пропорциональным инвестициям:

$$A = \text{norm}(A, k \cdot K), \quad (3)$$

где k – доля затрат на инновации, равномерно распределенная на интервале $[0.0002; 0.05]$ случайная величина;

- ✦ потомков могут оставить только крупные агенты (см. условие (2));
- ✦ потомок получает технологию и часть производственных факторов предка:

$$Y_c = dA_p K^\alpha L^{1-\alpha}, \quad (4)$$

где $d \in [0; 1]$ – доля факторов, передаваемая от предка к потомку.

Правила покупки технологии:

- ✦ стоимость технологии пропорциональна технологическому разрыву между покупателем и продавцом:

$$\text{val} = \text{price}(A_i - A_j), \quad (5)$$

где price – цена технологии (экзогенно задаваемый параметр);

- ✦ при покупке технологии наследуется только технологический параметр продавца (A_i).

Агенты, не располагающие достаточным для функционирования капиталом, вымирают:

$$K_i \leq K_{\min}, \quad (6)$$

где K_{\min} – пороговое значение капитала (экзогенно задаваемый параметр);

- ✦ радиус взаимодействия пропорционален уровню технологического развития агента:

$$\text{in_radius} = r \cdot A_i. \quad (7)$$

На основе предположений (1) – (7) в программной среде NetLogo [9] была разработана мультиагентная модель [10]. На *рис. 1* представлена визуализация эволюционного процесса. Здесь экономический агент представлен в виде треугольника, окрашенного в соответствии со значением своего выпуска (например, серый соответствует значению $Y = 1000$, красный – $Y = 2000$); домен агента окрашен в цвет его технологического параметра (A).

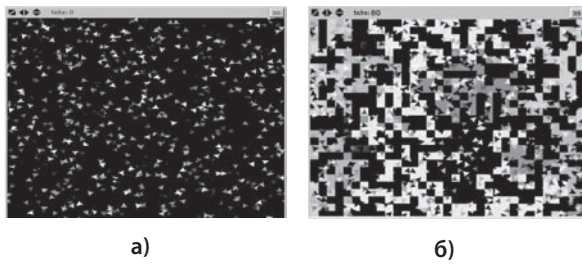


Рис. 1. Визуалізація модельного світа:
 а) в началі імітації; б) в кінці імітації

В начала імітації (рис. 1а) технології агентів подібні між собою, тому їх домени окрашені в один колір – сірий. В процесі моделювання спостерігається декілька хвиль появи і розповсюдження макротехнологій (окрашені в зелений домени агентів, розположені в центрі бежевого поля отображають процес виникнення нової макротехнології в епіцентрі предшествуючої, рис. 1б).

В мультиагентної моделі екзогенно задавалися початкове кількість агентів (*agent*), а також три параметра – тиск відбору (k_{\min} , k_{\max}) і ціна технології (*price*). Зде перші два параметра відповідають за розвиток еволюційного процесу, а ціна технології використовується для описання інноваційного клімату. Варіюючи ці параметри, ми спробуємо виявити допустимі межі їх зміни, проаналізувати чутливість модельного відклику до їх варіації.

На першому етапі аналізу в результаті експериментування з моделлю були визначені допустимі межі зміни параметрів [11]:

- ✦ для верхньої межі капіталу, досягаючи якої агент здатний стати інноватором або породити потомка, діапазон зміни склав 500 од., $K_{\max} \in [500; 1000]$;
- ✦ для нижньої межі капіталу, переходячи яку агент гине, діапазон зміни склав 400 од., $K_{\min} \in [0; 400]$;
- ✦ ціна розповсюдження технології може коливатися в діапазоні від нуля до п'яти сотень одиниць – $price \in [0; 500]$.

Далі кожен параметр варіювався в десяти точках всередині допустимого діапазону своєї зміни. При цьому інші параметри були зафіксовані на середніх рівнях всередині діапазону варіації: $K_{\max} = 750$, $K_{\min} = 200$, $price = 250$. Кожен експеримент включав в себе 100 прогнозу моделі.

Аналіз впливу варіації параметрів на загальний випуск системи показав, що збільшення числа агентів надає позитивний вплив на кінцеве значення випуску (рис. 2). Це може бути пояснено тим, що, в перших, кожен

агент вносить свій вклад в загальний випуск, во-вторых, з ростом числа агентів збільшується число контактів між ними, що призводить до збільшення швидкості дифузії інновацій по системі і, як наслідок, до економічного зростання.

Вплив верхньої межі капіталу на загальний випуск може бути описано s-образною кривою. Аналіз рис. 3 показує, що, починаючи з певного рівня ($K_{\max} = 800$), вплив цього параметра характеризується насиченням, і вимога до укрупненню агентів-новаторів втрачає ефективність з точки зору забезпечення економічного зростання.

Збільшення нижньої межі капіталу, навпаки, надає негативний вплив на розвиток системи, т. к. призводить до вимирання малих агентів, скороченню числа зв'язів між залишеними і сповільненню швидкості розповсюдження нових технологій (рис. 4).

Фактор ціни – один з найбільш цікавих з точки зору аналізу впливу на загальний випуск: коливання ціни в інтервалі 100 – 300 од. слабо впливають на розвиток модельного світа, в той час як якщо технології розповсюджуються безкоштовно, або навпаки дуже дорого, спостерігається стрімкий ріст загального випуску (рис. 5).

В цілому, аналіз впливу параметрів моделі на загальний випуск системи дозволив виявити три типи її розвитку (рис. 6) – з високим, середнім і низьким темпом.

Дослідження показало, що недостатнє кількість економічних агентів в системі і жорсткі умови їх виживання призводять до того, що технології

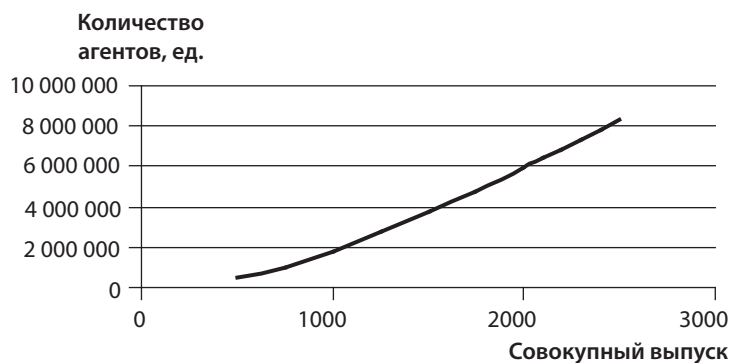


Рис. 2. Вплив численності агентів (*agent*) на загальний випуск (Y)

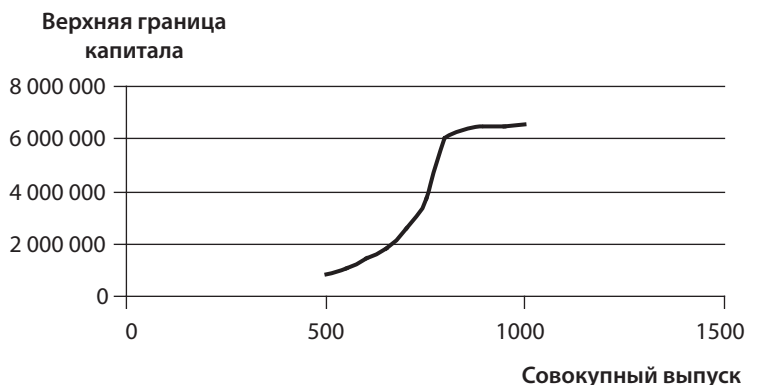


Рис. 3. Вплив верхньої межі капіталу (K_{\max}) на загальний випуск (Y)

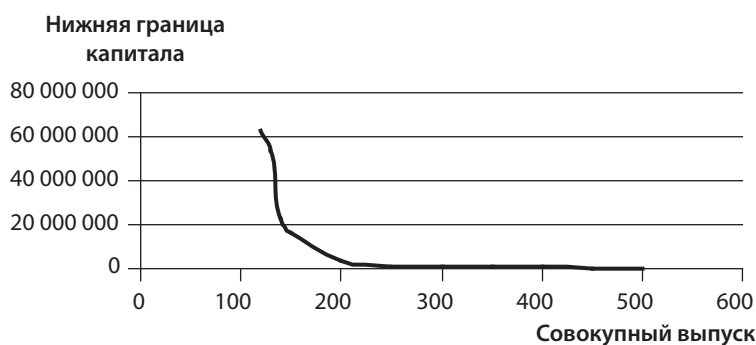


Рис. 4. Влияние нижней границы капитала (K_{\min}) на совокупный выпуск (Y)

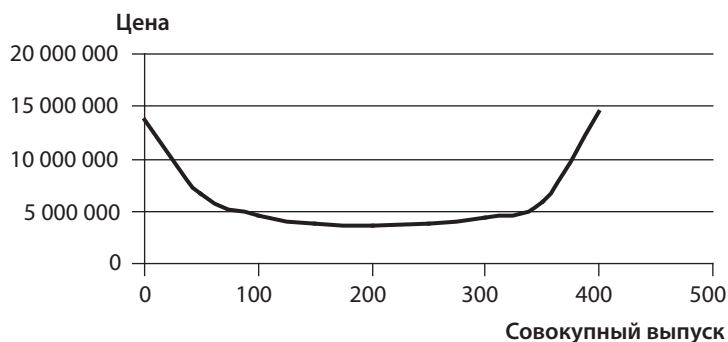


Рис. 5. Влияние цены (*price*) на совокупный выпуск (Y)

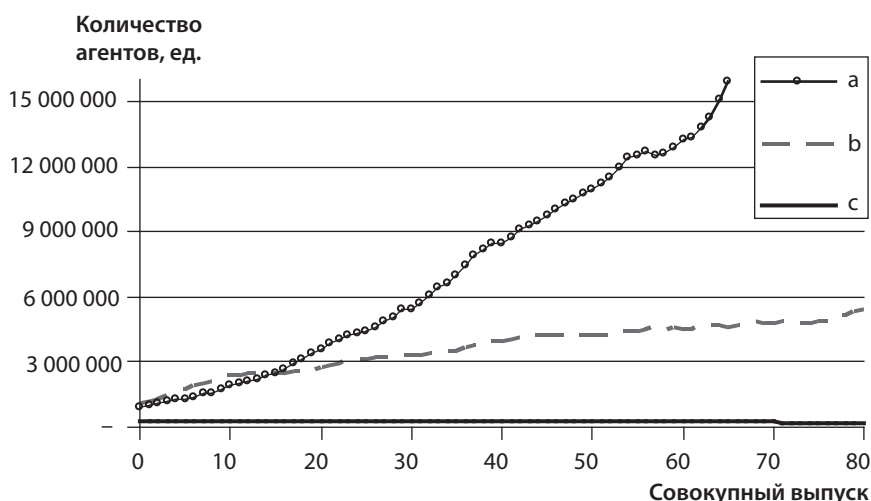


Рис. 6. Сравнительная динамика производства с различными темпами роста:
 а – высокий темп; б – средний темп; с – низкий темп

по модельному миру практично не розповсюджуються, тому зростання випуску за рахунок технологічного прогресу не відбувається. При цьому, т. к. можливостей для екстенсивного зростання не передбачено, розвитку системи в цілому також не спостерігається (рис. 6с).

Збільшення кількості економічних агентів (*agents* ≥ 2000) призводить до прискорення дифузії інновацій і забезпечує інтенсивний ріст системи, однак жорсткі вимоги до розмірам агентів, здатних породити потомка і/або стати джерелом інновацій, уповільнюють розвиток. Щодо вартості технології, то середні її значення (не надто низькі і не надто високі) також сприяють зростанню сукупного випуску з середніми темпами (рис. 6б).

М'які умови середовища, що дозволяють вижити навіть малим агентам, призводять до зростання загальної їх кількості, збільшенню каналів передачі інформації, і як наслідок, – до зростання швидкості розповсюдження нових технологій і розвитку модельного світу високими темпами. Інтересно, що такі траєкторії (рис. 6а) характеризуються граничними значеннями ціни технології. Отримані результати наведені в табл. 1 [12].

На другому етапі аналізу отримані в результаті експериментів з параметрами моделі набори траєкторій були досліджені на стаціонарність. Дослідження показало, що в цілому система не породжує ні стаціонарних траєкторій, ні тренд-

Темпы развития системы

Темп роста	Совокупный выпуск	Значения параметров	Интерпретация
Низкий	$Y < 3$ млн	$agents \leq 750$ $K_{min} \geq 250$	В системе мало агентов, плохо выживающих в условиях жесткой внешней среды
Средний	$Y \in [3 \text{ млн}; 10 \text{ млн}]$	$agents \geq 2000$ $K_{max} \geq 800$ $100 \leq price \leq 300$	Агентов в системе достаточно, но условия появления новых – жесткие. Стоимость технологии варьируется вокруг среднего значения
Высокий	$Y \geq 10$ млн	$K_{min} \leq 150$ $price = 0$ или $price \geq 400$	Мягкие условия выживания обеспечивают большое число агентов. Технологии распространяются или даром, или по очень высокой цене

стационарных траекторий выпуска (для описания динамики которых можно было бы подобрать адекватные кривые роста, но остатки данных моделей не являются стационарным процессом). Таким образом, все без исключения траектории совокупного выпуска можно отнести к интегрированным (разностно-стационарным или *DS – difference stationary*) рядам динамики, которые сочетают в себе стохастический тренд наряду с трендом детерминированным.

Экспериментирование с параметрами модели показало, что их вариация влияет не только на конечную точку (итоговое совокупное производство), но и на динамику модельных траекторий. По критерию вариативности (отношение стандартного отклонения к среднему по совокупности) удалось выявить три типа модельных траекторий и описать причины их возникновения (табл. 2).

Анализ табл. 2 показывает, что система развивается стабильно (рис. 7а), когда начальное количество агентов сравнительно невелико ($agents = 1500$), условия их выживания и появления новых не слишком мягкие ($K_{max} > 700$, $K_{min} > 300$), а цена технологии варьируется

вокруг среднего значения (от 100 до 300 ед., но чем она ниже, тем выше скорость развития системы).

С ростом цены технологии система теряет стабильность (рис. 7б).

Когда же при мягких условиях выживания число агентов и связей между ними быстро растет, выпуск также растет экспоненциально (как комбинация детерминированного экспоненциального и стохастического трендов) (рис. 7с). Интересно, что достижение ценой верхней границы также приводит к экспоненциальному росту выпуска в системе.

На третьем этапе исследования для двух групп траекторий выпуска – стабильной линейной и линейной с осцилляциями, с доверительной вероятностью не менее 95% были подобраны трендовые модели. Так как абсолютный прирост выпуска при неизменных параметрах модельного мира для ряда экспериментов оставался стабильной величиной (его вариация не превышала 25%), была поставлена задача оценки функциональной зависимости между средней величиной абсолютного прироста выпуска (ΔY) и величиной одного из экзогенных параметров – $agents$, K_{max} и K_{min} , $price$ (табл. 3).

Таблица 2

Типы траекторий системы

Вариативность	Тип траектории	Параметры модели	Интерпретация
Слабая $v < 30\%$	Линейный рост	$agents \leq 2000$ $50 \leq price < 300$	Количество агентов сравнительно небольшое, цена технологии невелика
Средняя $31\% < v < 75\%$	Линейный рост с сильными осцилляциями	$300 \leq price < 350$	Технологии относительно дороги
Сильная $v > 76\%$	Экспоненциальный рост с осцилляциями	$K_{min} \leq 140$ $price \geq 350$	Условия выживания мягкие, технологии крайне дороги

Таблица 3

Вид функциональной зависимости между средней величиной абсолютного прироста выпуска и значениями экзогенных параметров

Параметр X	Вид функциональной зависимости	Коэффициент детерминации	Средняя эластичность ΔY по X
$agents$	$\Delta Y = -18044 + 35 \cdot agents$	0,992	1,44%
$price$	$\Delta Y = 143894 - 1121 \cdot price + 2,6 \cdot price^2$	0,919	-1,48%
K_{max}	$\Delta Y = 80000 / (1 + 41056 \cdot e^{-0.01 \cdot K_{max}})$	0,954	4.32%
K_{min}	$\Delta Y = 67041 - 11234 \cdot Ln(K_{min})$	0,871	-14,7%

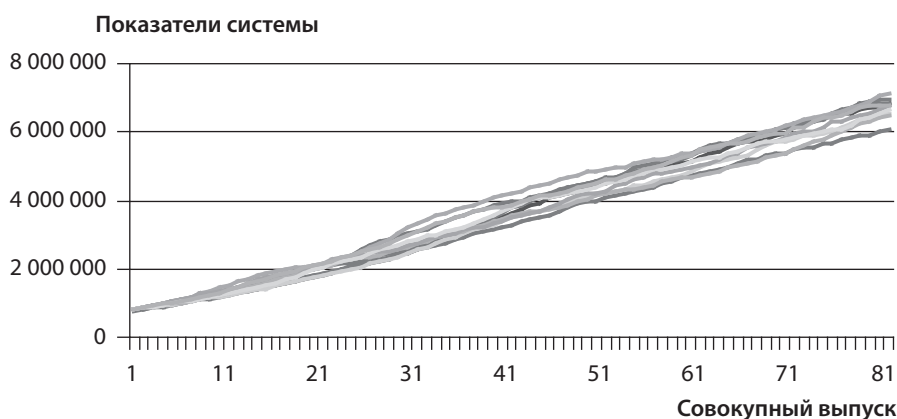


Рис. 7а). Линейный рост выпуска, $agents = 1500, K_{max} = 750, K_{min} = 200, price = 50$

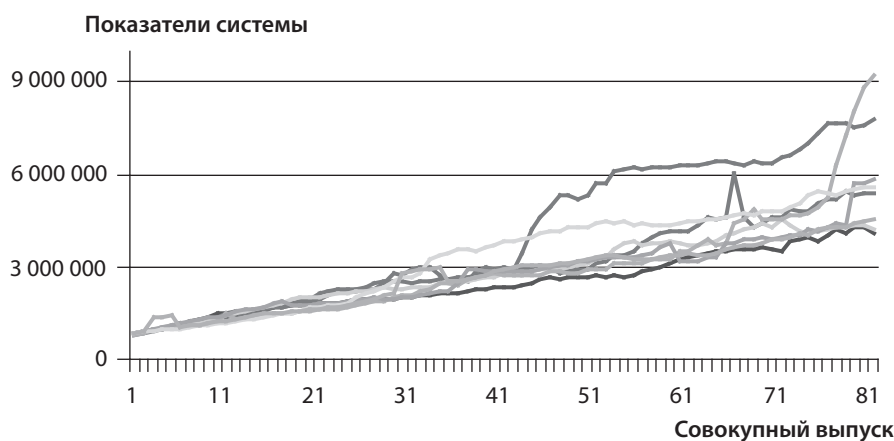


Рис. 7б). Линейный рост с осцилляциями, $agents = 1500, K_{max} = 750, K_{min} = 200, price = 250$

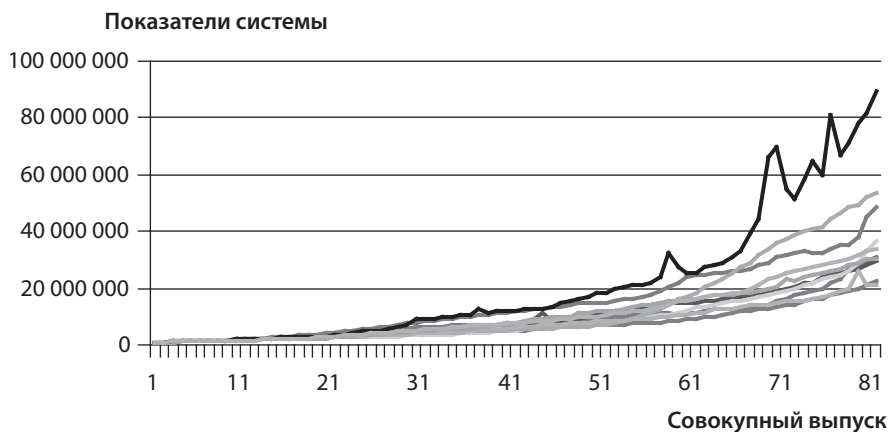


Рис. 7с). Экспоненциальный рост с осцилляциями, $agents = 1500, K_{max} = 750, K_{min} = 130, price = 250$

Как видно из табл. 3, абсолютный прирост выпуска высоко эластичен по параметрам, отражающим силу давления отбора (K_{max} и K_{min}). При значении $K_{min} \leq 200$ общий выпуск в системе растет экспоненциально, на интервале $200 < K_{min} \leq 350$ выпуск растет линейно, на интервале $350 < K_{min} \leq 500$ выпуск начинает линейно убывать.

ВЫВОДЫ

В целом, полученные в ходе сравнения фактических и модельных траекторий результаты свидетельствуют об адекватности положенных в ее основу гипотез и подтверждают возможность использования постро-

енной эволюционной модели взаимодействия экономических агентов для анализа влияния параметров технологического развития на характер и темпы макроэкономической динамики. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумпетер Й. Теория экономического развития. Капитализм, социализм и демократия = Capitalism, Socialism and Democracy / Йозеф Шумпетер / Пер. с англ. В. С. Автономова. – М.: ЭКСМО, 2007. – 864 с.
2. Нельсон Р. Р. Эволюционная теория экономических изменений / Ричард Р. Нельсон, Сидней Дж. Уинтер / Пер. с англ.

М. Я. Каждана ; науч. ред. пер. В. Л. Макаров ; Академия народного хозяйства при Правительстве Российской Федерации. – М. : Дело, 2002. – 540 с.

3. Докинз Р. Эгоистичный ген / Ричард Докинз / Пер. с англ. Н. Фоминой. – М. : АСТ:CORPUS. – 2013. – 512 с.

4. Маевский В. И. Введение в эволюционную макроэкономику / В. И. Маевский ; Российская Академия Наук. Институт экономики ; Центр эволюционной экономики. – М. : Япония сегодня, 1997. – 108 с.

5. Silverberg G. Innovation, diversity and diffusion: a self-organisation model / Gerald Silverberg, Giovanni Dosi, Luigi Orsenigo // *The Economic Journal*. – 1988. – Vol. 98, Issue 393. – Pp. 1032 – 1054.

6. Kwasnicki W. Market, innovation, competition: An evolutionary model of industrial dynamics/ W. Kwasnicki, H. Kwasnicka // *Journal of Economic Behavior & Organization, Elsevier*. – 1992. – Vol. 19 (3). – Pp. 343 – 368.

7. Research and Development Expenditure, United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (UNESCO) [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.uis.unesco.org/>

8. Коротаев А. В. Социальная эволюция: факторы, закономерности, тенденции / А. В. Коротаев ; Российская академия наук ; Ин-т востоковедения. – М. : Восточная литература. – 2003. – 287 с.

9. NetLogo [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

10. Кононова Е. Ю. Еволюція макрогенерацій: мультиагентний підхід / Е. Ю. Кононова, Н. В. Акулов // *Бизнес Информ.* – Харьков, 2013. – № 10. – С. 166 – 170.

11. Кононова Е. Ю. Моделирование макроэкономической динамики на основе мультиагентного подхода / Е. Ю. Кононова, П. В. Сухомлин // *Актуальні проблеми економіки України: тенденції, ризику, стимули : тези доповідей міжвуз. наук.-практ. конф. 8-9 листопада.* – Дніпропетровськ, 2013. – С. 191 – 192.

12. Кононова Е. Ю. Мультиагентная модель эволюции макрогенерацій: анализ чувствительности / Е. Ю. Кононова // *Моделирование и информационные технологии в исследовании социально-экономических систем: теория и практика : монография / Под ред. В. С. Пономаренко, Т. С. Клебановой.* – Бердянск, 2014. – С. 40 – 51.

REFERENCES

Dokinz, R. *Egoistichnyy gen* [The Selfish Gene]. Moscow: AST:CORPUS, 2013.

Kwasnicki, W., and Kwasnicka, H. "Market, innovation, competition: An evolutionary model of industrial dynamics". *Journal of Economic Behavior & Organization, Elsevier*, vol. 19 (3) (1992): 343-368.

Korotaev, A. V. *Sotsialnaia evoliutsiia: faktory, zakonomernosti, tendentsii* [Social evolution: factors, patterns and trends]. Moscow: Vostochnaia literatura, 2003.

Kononova, E. Yu., and Akulov, N. V. "Evoliutsiia makroheneratsii: multyahentnyi pidkhid" [Evolution macrogenerations: multi-agent approach]. *Biznes Inform*, no. 10 (2013): 166-170.

Kononova, E. Yu., and Sukhomlin, P. V. "Modelirovaniye makroekonomicheskoy dinamiki na osnove multiagentnogo podkhoda" [Modeling of macroeconomic dynamics based on multi-agent approach]. *Aktualni problemy ekonomiky Ukrainy: tendentsii, ryzyky, stymuly*. Dnipropetrovsk, 2013.191-192.

Kononova, E. Yu. "Multiagentnaia model evoliutsii makroheneratsiy: analiz chuvstvitelnosti" [Multi-agent model of evolution macrogenerations: sensitivity analysis]. In *Modelirovaniye i informatsionnye tekhnologii v issledovanii sotsialno-ekonomicheskikh sistem: teoriia i praktika*, 40-51. Berdiansk, 2014.

Maevskiy, V. I. *Vvedenie v evoliutsionnuu makroekonomiku* [Introduction to evolutionary macroeconomics]. Moscow: Yaponiia segodnia, 1997.

"NetLogo". <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

Nelson, R. R., and Uinter, S. Dzh. *Evoliutsionnaia teoriia ekonomicheskikh izmeneniy* [Evolutionary Theory of Economic Change]. Moscow: Delo, 2002.

"Research and Development Expenditure, United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (UNESCO)". <http://www.uis.unesco.org/>

Silverberg, G., Dosi, G., and Orsenigo, L. "Innovation, diversity and diffusion: a self-organisation model". *The Economic Journal*, vol. 98, no. 393 (1988): 1032-1054.

Shumpeter, Y. *Teoriia ekonomicheskogo razvitiia. Kapitalizm, sotsializm i demokratiia* [Theory of Economic Development. Capitalism, Socialism and Democracy]. Moscow: EKSMO, 2007.