

---

---

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

---

---

РЕГУЛИРОВАНИЕ КОЭВОЛЮЦИИ  
ЭКОНОМИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОПУЛЯЦИЙ  
В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

© 2017 г. А.В. Половян<sup>i</sup>, Е.Н. Вишневская<sup>ii</sup>

**Аннотация.** Новая индустриализация в мире и формирование новой глобальной промышленной структуры обостряют проблемы устойчивого развития. Часто экологически чистое развитие одних стран достигается за счет загрязнения экологии других, что создает проблемы для всех, и их решение требует международного регулирования. Для обоснования такого регулирования предложена математическая модель, которая описывает взаимодействие двух экономико-экологических популяций, представленных совокупностями предприятий и населения обособленных территорий. Территории отличаются доминирующими производственными технологиями, паттернами поведения экономических субъектов и экологическими последствиями их деятельности. Для построения модели использован синтез агентного и системно-динамического моделирования. Параметризация модели осуществлена на основе показателей функционирования Германии (пример экологически благополучной территории) и Украины (пример экологически неблагополучной территории). Проведенные эксперименты позволили оценить действенность трех различных способов регулирования коэволюции популяций с целью смягчения экологических проблем: 1) наказаний в форме повышения относительных издержек грязного поведения экономических субъектов на экологически неблагополучной территории посредством усиления экологического налогообложения; 2) поощрений в форме повышения относительных выгод чистого поведения экономических субъектов посредством трансферта на эту территорию более эффективных технологий очистки загрязнений; 3) смешанного воздействия, предполагающего комбинацию наказаний и поощрений. В результате моделирования выявлено, что наилучшие результаты дает смешанное воздействие, когда регулирование начинается с поощрения – трансферта технологий на экологически неблагополучную территорию, повышающего общую эффективность природоохранной деятельности на ней, а затем продолжается через усиление наказаний, стимулирующих изменение паттернов поведения экономических агентов и развитие инновационной системы, способной генерировать более эффективные технологические решения экологических проблем.

**Ключевые слова:** коэволюция, эколого-экономическая популяция, технология, системная динамика, агентное моделирование, экономическое регулирование.

**Классификация JEL:** C63, O33, Q56.

## ВВЕДЕНИЕ

Установка на устойчивое развитие, обычная в современной экономической политике, пока не приносит ожидаемых результатов в глобальном масштабе. Экологически чистое развитие одних территорий зачастую достигается за счет загрязнения других, а это в конечном счете создает проблемы для всех. Многие глобальные цепочки формирования стоимости (Global Value Chains, GVC) действуют так, что наиболее ресурсоемкие их звенья, обычно экологически грязные, расположены на одних территориях, а наукоемкие, обычно экологически чистые, – на других (Kuhndt et al., 2008). Например, относительное экологическое благополучие стран Западной Европы, выпускающих автомобили, связано с загрязнением других стран, добывающих уголь, руду и выплавляющих металл, который используется для производства этих автомобилей. То же самое можно сказать в отношении таких тяжелых сельскохозяйственных культур, как подсолнечник, рапс и др., их выращивание для производства биотоплива

<sup>i</sup>Алексей Владимирович Половян – д.э.н., доцент, директор, ГУ «Институт экономических исследований», Донецк; polovyann@yandex.ru.

<sup>ii</sup>Елена Николаевна Вишневская – к.э.н., доцент кафедры экономической теории и государственного управления, Донецкий национальный технический университет, Донецк; vishn.elena@gmail.com.

в Европе ведет к истощению восточно-европейских черноземов, сокращению ценных с экологической точки зрения лесов и др.

Это не оценочное суждение, а констатация результатов спонтанно сложившегося международного разделения труда. К тому же во многих развивающихся странах такое разделение труда воспринимается позитивно, поскольку участие в GVC позволяет расти занятости населения, объемам производства (пусть даже и грязного), валютной выручке и т.д., что обеспечивает рост ВВП, к чему обычно стремится каждое правительство. Но то, что может расцениваться как экономическая выгода назначенному на ограниченный срок очередному правительству, в перспективе может стать необратимым ущербом, причем для всех стран, задействованных в GVC.

Исходная предпосылка данной работы состоит в том, что спонтанная эволюция GVC привела к формированию двух доминирующих институтов – институтов, поощряющих экологически грязное поведение, и институтов, поощряющих экологически чистое поведение. Причем институты, поощряющее чистое поведение, смогли сформироваться только потому, что в другом месте сложился институт, который поощряет грязное поведение. По сути речь идет о коэволюции – совместном и взаимозависимом развитии отдельных экономико-экологических популяций, действующих в пределах своих территорий и направляемых разными институтами.

Отсюда возникла гипотеза – формирование и развитие институтов в разных экономико-экологических популяциях, обменивающихся материальными и финансовыми потоками, неявно связано. Поэтому устойчивое развитие только одного типа института невозможно, а требует международного регулирования процессов коэволюции институтов. Для обоснования путей решения этой проблемы требуется:

1) исследовать процессы коэволюции экономико-экологических популяций, участвующих в GVC, которые отличаются доминирующими паттернами поведения экономических субъектов и экологическими последствиями их деятельности;

2) дать оценку существующим тенденциям коэволюционных процессов и выявить факторы, влияющие на их течение;

3) обосновать меры по регулированию коэволюции популяций, способные изменить сложившиеся тенденции и обеспечить устойчивое развитие популяций.

Для проверки гипотезы предлагается построить модель коэволюции популяций, которая должна уметь:

1) имитировать поведение экономических субъектов (предприятий, действующих на территории данной популяции), с учетом того что их поведенческие паттерны, определяющие применяемые способы решения стоящих перед ними задач, могут быть разного типа;

2) описывать каждую популяцию через взаимодействие двух субпопуляций – экономической (совокупности предприятий, действующих на данной территории) и экологической (населения данной территории);

3) рассчитывать последствия коэволюции взаимосвязанных популяций, направляемых разными институтами, которые поощряют, соответственно, экологически грязное и чистое поведение.

В экономической литературе известны модели эволюции (Safarzynska, Bergh, 2010) и коэволюции (Gual, Norgaard, 2010) экономических и экологических систем. Базовыми являются модели эволюции. Одна из наиболее известных – модель Нельсона–Уинтера (Nelson, Winter, 1982). В данной статье мы развиваем идеи этих авторов о поведении экономических субъектов, повторяемые действия которых формируют институты.

Среди моделей взаимодействия экономики и экологии широко известны модели Дж. Форрестера, Д. Медоуза и др. (Forrester, 1970; Meadows et al., 1992; Bergh, Hofkes, 2010; Bosetti, 2009). Мы опираемся на эти идеи, в частности, при исследовании цепочки причинно-следственных связей между экономикой и экологией, в том числе с учетом различий в производственных технологиях, эффективности использования ресурсов и интенсивности загрязнения в экономически взаимосвязанных регионах (Wiedmann, 2009). Что же касается математических моделей

коэволюции, то их значительно меньше. Обзор, выполненный в работах (Gual, Norgaard, 2010; Kallis, Norgaard, 2010), показывает, что в экономике чаще применяются каузальные модели коэволюции, чем математические.

В данной статье предложена модель коэволюции различных экономико-экологических популяций, которая развивает идеи предшественников:

- *эволюционных биологов* – коэволюция популяций описывается изменением численности этих популяций, обеспечивающим передачу генотипов;
- *экономистов-эволюционистов* – хозяйственное развитие определяется стохастическим взаимодействием экономических субъектов с использованием механизмов изменчивости, наследственности и отбора;
- *социальных экологов* – экологическая система имеет прямые и обратные связи с экономической системой через воздействие на биологические характеристики населения.

### КОГНИТИВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛИ

Пусть имеются две территории, в каждой из которых взаимодействуют две субпопуляции: экономическая (предприятия) и экологическая (население). В совокупности они составляют общую экономико-экологическую популяцию. В нашем понимании экономико-экологическая популяция – это совокупность экономических субъектов (предприятий) и населения, расположенных и действующих в пределах некоторой обособленной территории.

Организационные рутины предприятий популяции формируют их поведенческие паттерны – предрасположенность действовать определенным образом в определенном рода ситуации (Becker, 2008). Предполагается, что такие паттерны могут быть двух типов – альтруистического и эгоистического, поэтому далее все предприятия мы будем условно называть или эгоистами, или альтруистами.

Под *эгоистами* понимаются предприятия, которые не считают с издержками общества от загрязнения окружающей природной среды (ОПС) и не стремятся улучшить очистку

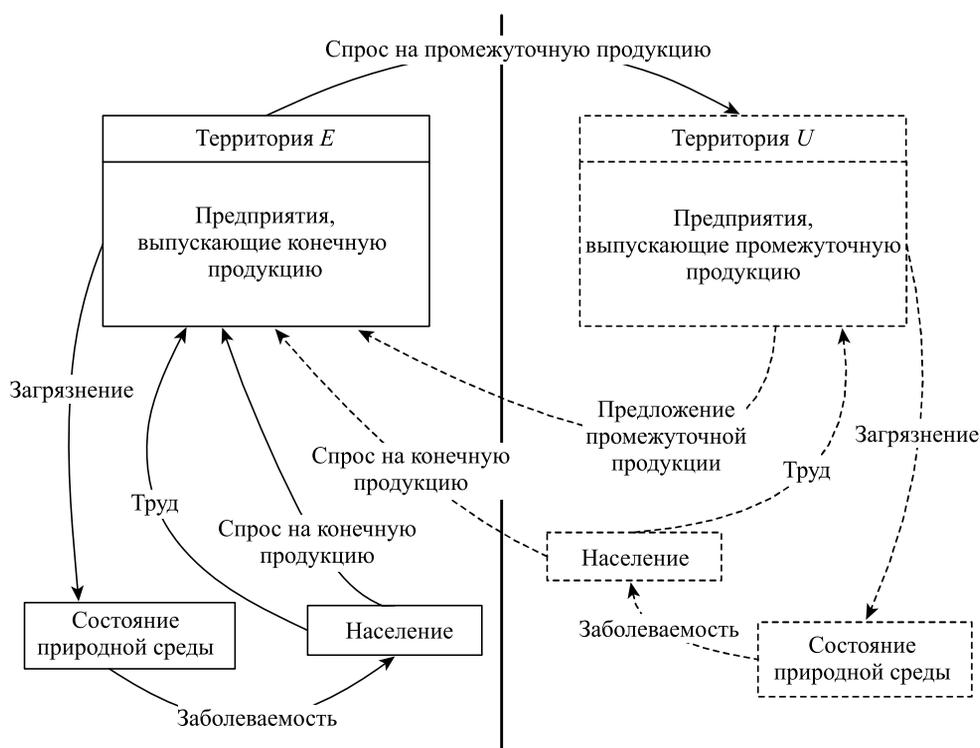


Рис. 1. Когнитивная модель взаимодействия территорий

эмитируемых ими загрязнений<sup>3</sup>. Под *альтруистами* понимаются предприятия, которые учитывают издержки общества, связанные с загрязнением ОПС, и стремятся улучшить очистку эмитируемых ими загрязнений, направляя на эти цели собственные ресурсы.

Экономическая субпопуляция производит товары и загрязнение (часть которого убирается с помощью очистки). Экологическая субпопуляция потребляет часть товаров и загрязнения, а взамен предоставляет рабочую силу для экономической субпопуляции (рис. 1). Территории отличаются между собой. Территория *E* специализируется на производстве конечной продукции, выпуск которой связан с низким загрязнением ОПС. Установка на низкое загрязнение ОПС является доминирующим институтом. Территория *U* специализируется на производстве промежуточной продукции, выпуск которой связан с высоким загрязнением ОПС. Установка на безразличное отношение к загрязнению ОПС является доминирующим институтом.

Между экономическими субпопуляциями территорий существует связь — промежуточная продукция территории *U* составляет входящий ресурс для производства конечной продукции на территории *E*. Эта конечная продукция потребляется и на территории *E*, и на территории *U*. Экологические субпопуляции территорий *E* и *U* между собой не взаимодействуют (например, в связи с отсутствием смежных границ или по причине ограничений въезда людей на территорию *E*). Загрязнение, которое продуцируется на каждой территории, распространяется только на нее и не затрагивает другую территорию (т.е. не переносится ветром, водой и т.п.).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

### Экономическая субпопуляция

#### Производственный блок

На каждой территории выпуск продукции  $Q_t^i$  предприятием  $i$  в периоде  $t$  определяется с помощью производственной функции<sup>4</sup>

$$Q_t^i = \frac{Q_t^i}{F_t^i} \frac{F_t^i}{Lq_t^i} Lq_t^i = A_t^i f_t^i Lq_t^i, \quad (1)$$

где  $F_t^i$  — стоимость основных производственных фондов предприятия  $i$  в периоде  $t$ ;  $A_t^i$  — фондоотдача;  $f_t^i$  — фондовооруженность ( $f_t^i = \text{const}$ );  $Lq_t^i$  — количество отработанного времени.

Кроме выпуска продукции, каждое предприятие занимается утилизацией загрязнений, связанных с таким выпуском, или, образно выражаясь, производством чистоты:

$${}^+Qa_t^i = \frac{Qa_t^i}{Fe_t^i} \frac{Fe_t^i}{Le_t^i} Le_t^i = Aa_t^i fe_t^i Le_t^i, \quad (2)$$

$${}^+Qw_t^i = Aw_t^i fe_t^i Le_t^i, \quad (3)$$

$${}^+Ql_t^i = Al_t^i fe_t^i Le_t^i, \quad (4)$$

где  ${}^+Qa_t^i$ ,  ${}^+Qw_t^i$ ,  ${}^+Ql_t^i$  — объемы утилизации выбросов в атмосферный воздух, сбросов в водоемы и отходов производства соответственно;  $Fe_t^i$  — стоимость основных фондов природоохранного назначения предприятия  $i$  в периоде  $t$ ;  $Aa_t^i$ ,  $Aw_t^i$ ,  $Al_t^i$  — фондоотдачи основных фондов природоохранного назначения;  $fe_t^i$  — фондовооруженность (для основных фондов

<sup>3</sup> Предполагается, что даже в случае ужесточения наказаний за загрязнение ОПС эгоист не будет инвестировать в новые природоохранные технологии, а предпочтет снизить свои издержки, например посредством подкупа контролеров, или выйдет из бизнеса.

<sup>4</sup> Данная производственная функция является модификацией функции, которую предложили для эволюционного моделирования Р. Нельсон и С. Уинтер (Nelson, Winter, 1982). Их идея состоит в том, что фактор научно-технического прогресса учитывается через изменение фондоотдачи. В предложенную нами формулу дополнительно включен фактор труда (количество отработанного времени) и фактор фондовооруженности, которые необходимы для описания взаимосвязи экономической и экологической субпопуляций.

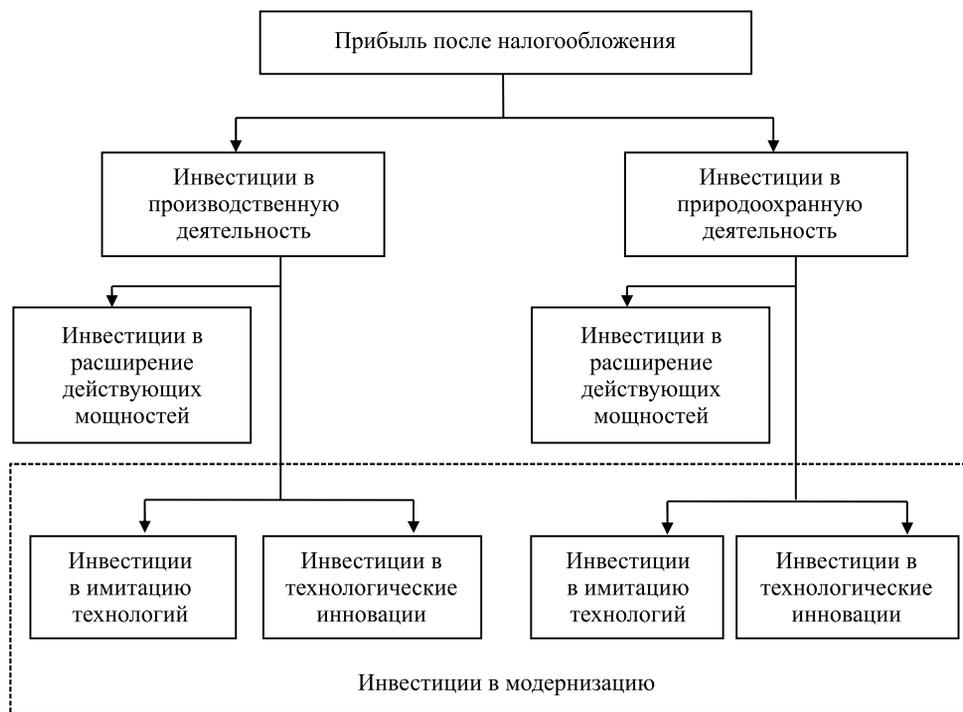


Рис. 2. Схема распределения прибыли предприятия

природоохранного назначения  $fe_i^i = \text{const}$ );  $Le_i^i$  – количество отработанного времени в природоохранной деятельности.

Предложение произведенной продукцией предприятием  $i$  в периоде  $t$  определяется по формуле

$$\widehat{Q}_t^i = Q_t^i + Z_{t-1}^i, \tag{5}$$

где  $Z_{t-1}^i$  – нереализованная продукция в периоде  $t-1$ :

$$Z_{t-1}^i = \begin{cases} \widehat{Q}_{t-1}^i - Q_{t-1}^i, & \widehat{Q}_{t-1}^i > Q_{t-1}^i, \\ 0, & \widehat{Q}_{t-1}^i \leq Q_{t-1}^i, \end{cases} \tag{6}$$

$Q_{t-1}^i$  – объем реализованной продукции в периоде  $t-1$ .

Предполагается, что предприятия функционируют на конкурентном рынке, т.е. цены на конечную продукцию задаются экзогенно (т.е. зависят от объемов агрегированного спроса и предложения, а не выбираются предприятиями). Поэтому прибыль предприятия  $P_t^i$  равна разнице между стоимостью реализованной продукции и издержками производства  $C_t^i$  с учетом налоговых платежей  $\tau$ :

$$P_t^i = (Q_{t-1}^i - C_t^i)(1 - \tau). \tag{7}$$

Для определения  $C_t^i$  предлагается использовать производственную функцию

$$C_t^i = \delta (Fe_t^i + F_t^i)^\psi (Q_t^i)^\nu + (-Qa_t^i)\tau^a + (-Qw_t^i)\tau^w + (-Ql_t^i)\tau^l, \tag{8}$$

где  $-Qa_t^i$ ,  $-Qw_t^i$ ,  $-Ql_t^i$  – сальдо загрязнения ОПС выбросами в атмосферный воздух, сбросами в водные ресурсы и размещениями отходов соответственно;  $\tau^a$ ,  $\tau^w$ ,  $\tau^l$  – ставки экологических налогов;  $\delta$ ,  $\psi$ ,  $\nu$  – параметры производственной функции.

На рис. 2 приведена процедура распределения прибыли, остающейся в распоряжении предприятия. Предполагается, что прибыль полностью направляется в производственную или

природоохранную деятельность. При этом эгоисты только имитируют применение доступных природоохранных технологий, а альтруисты не только применяют природоохранные технологии, но и занимаются разработкой новых.

Численность эгоистов и альтруистов в экономической субпопуляции со временем изменяется вследствие естественного отбора, что приводит к изменению структуры субпопуляции. Условие их воспроизводства задано формулой

$$R_t^i = \frac{P_t^i}{C_t^i} \geq R_n, \quad (9)$$

где  $R_n$  – нормативный уровень рентабельности. Экономический смысл этой формулы состоит в том, что если стратегия данного экономического субъекта (альтруиста или эгоиста) приводит к повышению эффективности его хозяйственной деятельности, он воспроизводит себе подобного, руководствующегося такими же поведенческими паттернами. Если нет, то воспроизводства не происходит.

Считается, что на каждой территории исторически сложился свой уровень рентабельности, который учитывает особенности ее институциональной среды. Если выполняется условие  $F_t^i \leq F_n$  (где  $F_n$  – нормативная величина стоимости основных фондов) или же в течение трех периодов предприятие несет убытки ( $P_t^i < 0$ ), субъект вымирает (удаляется из субпопуляции).

Таким образом, структура экономической субпопуляции является динамической и может изменяться в зависимости от сравнительных преимуществ альтруистического или эгоистического поведения.

Как эгоисты, так и альтруисты могут направлять свою прибыль на расширение уже действующих мощностей и/или на их модернизацию (через имитацию уже известных технологий или разработку новых). Модернизацией предприятия занимаются только в том случае, если текущая норма рентабельности ( $R_t^i = P_t^i / C_t^i$ ) ниже некоторой пороговой величины (достаточной, чтобы удержать бизнес в данном виде деятельности).

Освоение инвестиций в расширение действующих мощностей приводит к возрастанию стоимости основных производственных фондов:

$$F_t^i = \begin{cases} F_{t-1}^i - NA F_{t-1}^i + I_t^i = F_0^i - \int_0^T H_t^i dt + \int_0^T I_t^i dt, & P_t^i > 0; \\ F_{t-1}^i - NA F_{t-1}^i = F_0^i - \int_0^T H_t^i dt, & P_t^i \leq 0, \end{cases} \quad (10)$$

где  $NA$  – норма амортизации;  $H_t^i$  – амортизационные платежи;  $T$  – общее число периодов.

Модернизация мощностей и связанный с ней научно-исследовательский процесс осуществляются по логике, предложенной в работе (Nelson, Winter, 1982, p. 281–287). При этом НИОКР генерируют новые значения фондоотдачи с помощью двухэтапного стохастического процесса.

Первый этап характеризуется независимыми случайными величинами  $dm$  и  $dn$ , которые принимают значения 0 или 1. Согласно значениям этих случайных величин предприятию выпадает (или не выпадает) жребий заниматься модернизацией. На втором этапе определяются вероятности успеха инвестиций:

$$\Pr(dm = 1) = \frac{K\_rm_t^i - K\_rm_t^{min}}{K\_rm_t^{max} - K\_rm_t^{min}}; \quad \Pr(dn = 1) = \frac{K\_rn_t^i - K\_rn_t^{min}}{K\_rn_t^{max} - K\_rn_t^{min}}, \quad (11)$$

где  $K\_rm_t^{max}$ ,  $K\_rm_t^{min}$  – соответственно, максимальные и минимальные затраты на имитацию уже известной технологии предприятиями отрасли в периоде  $t$ ;  $K\_rn_t^{max}$ ,  $K\_rn_t^{min}$  – соответственно максимальные и минимальные затраты на разработку новой технологии предприятиями отрасли в периоде  $t$ .

Инвестиции (см. рис. 2) могут использоваться для имитации технологий и/или технологических инноваций. Если предприятию достается имитация, ему предоставляется возможность

выявить и адаптировать наилучшую из числа доступных практик в отрасли<sup>5</sup>. Если же предприятию выпадает инновация, оно выбирает технологию, исходя из распределения технологических возможностей в отрасли  $An_t$ :

$$An_t = f^n(t). \quad (12)$$

Для предприятия, которому достался как инновационный, так и имитационный жребий, уровень фондоотдачи задается выражением

$$A_{t+1}^i = \max(A_t^i, \tilde{A}_t, An_t), \quad (13)$$

где  $\tilde{A}_t$  – наивысший (соответствующий наилучшей практике) уровень производительности в отрасли. Если предприятию не достается ни имитации, ни инновации, то фондоотдача остается на прежнем уровне<sup>6</sup>.

Поскольку предприятие развивается, изменяются  $F_t^i$  и  $Fe_t^i$  и, соответственно, в предположении, что  $f_t^i = f_0^i = \text{const}$ , будет другим общее количество использованного труда  $L_t^i = Lq_t^i + Le_t^i$ . Суммарный спрос предприятия на труд  $\tilde{L}_t^i$  составляет

$$\tilde{L}_t^i = \frac{F_t^i}{f_t^i} + \frac{Fe_t^i}{fe_t^i} = \tilde{\Lambda}q_t^i + \tilde{\Lambda}e_t^i. \quad (14)$$

Общий удовлетворенный спрос предприятия на труд  $Lf_t^i$  определяется в зависимости от предложения на рынке труда каждой территории  $\hat{L}_t^i$ :

$$L_t^i = \begin{cases} \tilde{\Lambda}_t^i, & \hat{L}_t^i \geq \sum_{i=1}^n \tilde{\Lambda}_t^i; \\ \tilde{\Lambda}_t^i \hat{L}_t^i / \sum_{i=1}^n \tilde{\Lambda}_t^i, & \hat{L}_t^i < \sum_{i=1}^n \tilde{\Lambda}_t^i, \end{cases} \quad (15)$$

удовлетворенный спрос предприятия на труд для производства продукции –

$$Lq_t^i = \begin{cases} \tilde{\Lambda}q_t^i, & \tilde{\Lambda}q_t^i = L_t^i; \\ \tilde{\Lambda}q_t^i L_t^i / \tilde{\Lambda}_t^i, & \end{cases} \quad (16)$$

удовлетворенный спрос на труд для природоохранной деятельности –

$$Le_t^i = \begin{cases} \tilde{\Lambda}e_t^i, & \tilde{\Lambda}_t^i = \hat{L}_t^i, \\ \left(1 - \frac{\tilde{\Lambda}q_t^i}{\tilde{\Lambda}_t^i}\right) \hat{L}_t^i, & \end{cases} \quad (17)$$

где  $n$  – число предприятий (субъектов) на территории.

#### *Природоохранный блок*

Результатом производства чистоты является уменьшение загрязнений ОПС. Сальдо загрязнений определяется по формуле:

<sup>5</sup>Наиболее доступными для имитации являются прежде всего second-hand-технологии (Дементьев, 2006). Это обстоятельство учтено в модели через отсеечение из множества доступных технологических решений тех, которые относятся к числу новейших (созданных в течение последних 5 лет). Что же касается возможности успешной адаптации более продвинутых технологий, они связаны с наращиванием научно-технических знаний, причем чем выше исходный уровень этих знаний у имитатора, тем меньше соответствующие входные затраты на налаживание нового производства и достижение его эффективных масштабов (Дементьев, 2009). Однако этот вопрос составляет предмет отдельного исследования и в данной работе специально не рассматривается.

<sup>6</sup>Предприятия априори не знают, окупятся ли их новаторские (имитаторские) усилия и какой конкретно уровень расходов на НИОКР им может понадобиться. Ответ на этот вопрос зависит от выборов, сделанных другими предприятиями популяции.

$$\begin{cases} -Qa_t^i = -Qa_0^i + \int_0^T -Atm_t^i dt - \int_0^T +Qa_t^i dt; \\ -Qw_t^i = -Qw_0^i + \int_0^T -Wat_t^i dt - \int_0^T +Qw_t^i dt; \\ -Ql_t^i = -Ql_0^i + \int_0^T -Lan_t^i dt - \int_0^T +Ql_t^i dt, \end{cases} \quad (18)$$

где  $-Qa_t^i$ ,  $-Qw_t^i$  и  $-Ql_t^i$  – сальдо загрязнения выбросами в атмосферный воздух, сбросами в водные ресурсы и размещением отходов соответственно;  $-Atm_t^i$ ,  $-Wat_t^i$ ,  $-Lan_t^i$  – объемы загрязнения выбросами, сбросами и размещением отходов соответственно.

Расчет объемов загрязнения выбросами, сбросами и размещением отходов в периоде  $t$  осуществляется по формуле

$$\begin{cases} -Atm_t^i = f^{Atm-}(Q_t^i), \\ -Wat_t^i = f^{Wat-}(Q_t^i), \\ -Lan_t^i = f^{Lan-}(Q_t^i), \end{cases} \quad (19)$$

где  $f^{Atm-}$ ,  $f^{Wat-}$ ,  $f^{Lan-}$  – функции загрязнений. Считается, что предприятия утилизируют только собственные загрязнения.

**Экологическая субпопуляция.** Как отмечено выше, экологическая субпопуляция представлена населением, проживающим на данной территории ( $U$  или  $E$ ), которое подразделено на четыре возрастные группы (0–14, 15–24, 25–64 и больше 64 лет).

Динамика численности населения рассчитывается по формуле

$$PL_t^v = PL_{t-1}^v + Rb_t^v - Rd_t^v + Rs_t^{v-1} - Rs_t^v,$$

где  $PL_t^v$  – численность населения в группе  $v$ ;  $Rb_t^v$  – число родившихся в группе  $v$ ,  $Rb_t^v = \text{const}$ ;  $Rd_t^v$  – число умерших в группе  $v$ ;  $Rs_t^{v-1}$ ,  $Rs_t^v$  – число перешедших из одной возрастной группы в другую.

Коэффициент смертности для соответствующей группы населения зависит от величины агрегированного загрязнения ОПС  $Rd_t^v = f^{Rd}(-AQ_t^i, -WQ_t^i, -LQ_t^i)$ .

Предложение на рынке труда каждой территории ( $\tilde{L}_t^i$ ):

$$\tilde{L}_t^i = f^l(PL_t^2 + PL_t^3), \quad (20)$$

где  $PL_t^v$  – численность населения во 2 и 3 группах.

**Взаимодействие популяций.** Взаимодействие популяций, функционирующих в пределах территорий  $U$  и  $E$ , осуществляется по следующим направлениям.

Во-первых, численность населения территории  $U$  и  $E$  определяет величину спроса на продукцию территории  $E$   $\left(\sum_{i=1}^n \tilde{Q}E_t^i\right)$ :  $\sum_{i=1}^n \tilde{Q}E_t^i = f^Q(PL_t^v, PLU_t^v)$ , где  $PL_t^v$ ,  $PLU_t^v$  – численность населения в возрастных группах 2–4 на территориях  $E$  и  $U$  соответственно.

Во-вторых, объем производства предприятий территории  $E$  зависит от выпуска продукции предприятиями  $U$ . Для учета этой зависимости выпуск продукции предприятий территории  $E$  корректируется на коэффициент  $k$ , который определяется с помощью логистической функции  $k = 1/(\alpha\beta^{QY_t} + \gamma)$ , где  $QY_t$  – суммарный выпуск продукции территории  $U$ ;  $\beta, \alpha, \gamma$  – параметры функции,  $0 < \beta < 1$ ,  $\alpha > 0, \gamma > 0$ .

При соответствующем подборе параметров данной функции рост суммарного выпуска продукции на территории  $U$  обеспечит ее значение, приблизительно равное 1. В то же время сокращение суммарного выпуска продукции обусловит снижение данного коэффициента до 0.

В-третьих, агрегированный выпуск продукции территории  $E$  определяет спрос на продукцию, произведенную на территории  $U$ :

$$\tilde{Q}Y_t = f_Q(\tilde{Q}E_t). \quad (21)$$

**Реализация модели, параметризация и верификация.** Модель коэволюции популяций реализована в программной среде AnyLogic 6.0<sup>7</sup>, которая позволяет объединять методы системно-динамического и агентного моделирования. Такое сочетание потребовалось потому, что для имитации развития экологических субпопуляций территорий  $U$  и  $E$  хорошо подходит инструментарий системной динамики (Forrester, 2007), а для имитации взаимодействия субъектов экономических субпопуляций – инструментарий агентного моделирования (Bonabeau, 2002). Это объясняется тем, что системная динамика предназначена для описания агрегированных процессов и явлений (через так называемые потоки и накопители) в предпосылке соблюдения устоявшихся правил поведения экономических субъектов, а агентное моделирование позволяет исследовать закономерности возникающего поведения (emergent behavior), которое является результатом повторяющихся взаимодействий этих субъектов в условиях динамичной внешней среды.

В качестве объектов для параметризации модели выбраны два государства, которые можно считать типичными представителями территорий  $E$  и  $U$ , – Германия (развитая экономика с институтами, поощряющими экологически чистое поведение) и Украина (эмерджентная экономика с институтами, поощряющими экологически грязное поведение).

Каждый из объектов характеризуется своей структурой экономической субпопуляции – соотношением альтруистов и эгоистов  $\psi$ . В процессе параметризации для каждого объекта это соотношение подбиралось таким образом, чтобы на протяжении всего периода аппроксимации (2008–2013 гг.) динамика и значения показателей развития популяции, обусловленные особенностями поведения альтруистов и эгоистов, соответствовали реально наблюдавшимся тенденциям (табл. 1).

Построенная и параметризованная модель позволяет проверить гипотезу о силе взаимозависимости двух популяций экономических субъектов с различными уровнями природоохранной деятельности, а также сравнить эффективность различных методов регулирования коэволюции популяций.

Для этого были проведены следующие модельные эксперименты:

- 1) развитие без учета связей между экономико-экологическими популяциями территорий  $U$  и  $E$ ;
- 2) развитие с учетом связей между этими популяциями через цепочки поставок товаров;

**Таблица 1.** Результаты верификации модели (средние значения за 2008–2013 гг.)

Показатель	Единица измерения	Украина			Германия		
		Факт	Модель	Ошибка, %	Факт	Модель	Ошибка, %
Численность постоянного населения	млн чел.	46,4	45,9	1,1	82,2	81,9	0,4
	%*	–0,57	–0,72	x	–0,3	–0,39	x
Объем промышленного производства	млрд грн./млрд евро	754,3	775,4	2,8	640,9	589,1	8,1
	%*	0,92	1,01	x	6,5	4,55	x

<sup>7</sup>Anylogic.com. Multimethod Simulation Software and Solutions (<http://www.anylogic.com/>).

Таблица 1 (окончание)

Показатель	Единица измерения	Украина			Германия		
		Факт	Модель	Ошибка, %	Факт	Модель	Ошибка, %
Сальдо загрязнений атмосферной стационарными источниками	млн т	4,4	4,0	8,2	3,9	3,9	0,0
	%*	0,6	0,36	х	-2,7	-2,82	х
Сальдо загрязнений водных объектов	млрд м <sup>3</sup>	7,1	7,5	5,6	0,07	0,11	5,7
	%*	0,74	1,88	х	-3,3	-2,3	х
Сальдо загрязнений промышленными отходами	млрд т	20,7	22,1	6,8	0,048	0,043	10,4
	%*	1,7	3,3	х	2,7	2,8	х

**Примечание.** В таблице символом «\*» отмечены темпы прироста, символом «х» – ячейки, значение для которых не рассчитывается.

*Источники:* статистические данные для параметризации модели (о численности населения, объемах производства, сальдо загрязнений и др.), представленные на сайтах <http://www.ukrstat.gov.ua>; <http://data.un.org>; <http://www.oecd-ilibrary.org>; <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>; <http://apps.who.int>.

3) регулирование коэволюции популяций посредством повышения издержек грязного поведения экономических субъектов на территории  $U$ ;

4) регулирование коэволюции популяций посредством повышения выгод чистого поведения экономических субъектов на территории  $U$ ;

5) регулирование коэволюции популяций посредством смешанного воздействия – как поощрения чистого поведения, так и наказания грязного поведения экономических субъектов на территории  $U$ .

Горизонт моделирования – 50 шагов. Временное значение шага моделирования – 1 год.

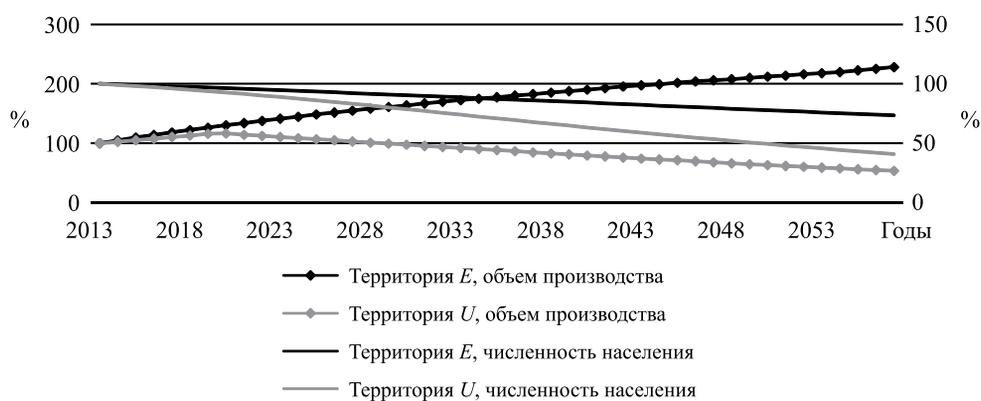
## ЭКСПЕРИМЕНТЫ

**Эксперимент 1 (базовый). Моделирование развития без учета связей между эколого-экономическими популяциями.** На рис. 3, что в допущении о независимом развитии динамика показателей, характеризующих экономико-экологическое состояние территорий,  $E$  и  $U$  имеют разные тенденции<sup>8</sup>.

Для территории  $E$  характерен умеренный рост объемов промышленного производства (среднегодовой темп прироста 1,7%) и сокращение общей численности постоянного населения, не связанное с загрязнением ОПС (-0,07%)<sup>9</sup>, а также постепенное уменьшение техногенной нагрузки на ОПС – среднегодовые темпы прироста загрязнений отрицательные и составляют: атмосфера – на 1,7%, водные ресурсы – на 7%, промышленные отходы – на 1,5%. Такая ситуация объясняется тем, что на территории  $E$  преобладают предприятия с альтруистическим типом поведения ( $\psi_E = 0,55$ ), которые учитывают социальные издержки, связанные с загрязнением ОПС, и стремятся улучшить очистку эмитируемых ими загрязнений.

<sup>8</sup>Приведенные здесь и далее результаты расчетов нельзя характеризовать как прогнозы. Построенная модель не предназначена для прогнозирования. Ее предназначение состоит в ином – исследовании тенденций и закономерностей взаимосвязанного развития экономико-экологических популяций, отличающихся доминирующими производственными технологиями, паттернами поведения экономических субъектов и экологическими последствиями их деятельности.

<sup>9</sup>Отрицательные темпы прироста населения Германии, которые наблюдаются с 1970-х годов, не связаны с ростом заболеваемости от загрязнения ОПС.



**Рис. 3.** Динамика основных показателей развития экономико-экологических популяций в базовом варианте (базисные темпы роста) (слева – темп роста объема производства, справа – темп роста численности)

На территории  $U$  на протяжении моделируемого периода также наблюдается ежегодное снижение численности населения с темпом 1,8%, но обусловлено оно, в том числе, ростом техногенной нагрузки на ОПС – среднегодовые темпы прироста загрязнения ОПС являются положительными и составляют: атмосфера – 1,5%, водные ресурсы – 2,8%, промышленные отходы – 2,1%. Это, в свою очередь, ведет к сокращению трудоспособного населения и дефициту рабочей силы. В результате сначала идет замедление темпов роста, а затем – снижение объемов промышленного производства. Причина состоит в том, что на территории  $U$  преобладают предприятия с эгоистическим типом поведения ( $\psi_U = 0,09$ ), которые нацелены на получение быстрых результатов и не принимают во внимание внешние эффекты, связанные с загрязнением ОПС.

**Эксперимент 2. Моделирование коэволюции экономико-экологических популяций двух территорий (спонтанное развитие).** Данный эксперимент предполагает взаимозависимое развитие популяций, когда промышленное производство конечной продукции на территории  $E$  зависит от производства промежуточных товаров на территории  $U$ , а конечная продукция потребляется населением обеих популяций.

В таких условиях экономические и экологические тенденции развития территории  $U$  остаются практически неизменными (среднегодовые темпы прироста загрязнения ОПС составляют: атмосфера – 0,8%, водные ресурсы – 2,2%, промышленные отходы – 1,5%), тогда как на территории  $E$  начинает наблюдаться снижение темпов прироста производства под влиянием негативных тенденций развития на территории  $U$ : ежегодный темп прироста промышленного производства составляет 1,4% против 1,7% в базовом варианте. В свою очередь, это отрицательно сказывается на инвестиционной активности экономических субъектов и, как следствие, на темпах развития природоохранных технологий на территории  $E$ .

Данный эксперимент подтвердил, что со временем негативные изменения в развитии одной территории (в том числе негативная экологическая ситуация) через цепочки поставок товаров начинают оказывать отрицательное влияние на динамику развития другой территории с изначально более благополучным состоянием экономики и экологии. Причем без регулирующего внешнего воздействия такие спонтанные неблагоприятные тенденции являются устойчивыми. Это объясняется тем, что на каждой территории выгоды эгоистического и альтруистического поведения не изменяются. Поэтому структуры популяций экономических субъектов ( $\psi_E = 0,55$  и  $\psi_U = 0,09$ ) остаются постоянными, как и преобладающие на территориях поведенческие паттерны.

В последующих экспериментах проверяется гипотеза о действенности различных способов регулирования коэволюции экономико-экологических популяций разных территорий, призванного смягчить негативные последствия спонтанного развития.

**Эксперимент 3. Регулирование коэволюции экономико-экологических популяций с помощью экологических налогов.** Идея состоит в том, чтобы, повышая экологические налоги на территории  $U$ , увеличить издержки экономических субъектов от загрязнения окружающей среды, стимулируя тем самым их к уменьшению этих издержек посредством развития и применения

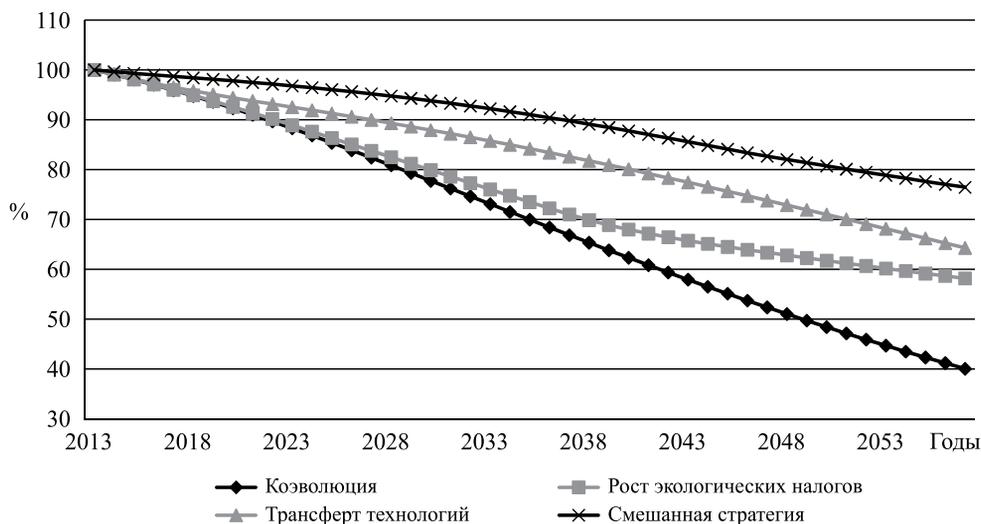


Рис. 4. Динамика численности населения на территории  $U$  при разных экспериментах (базисные темпы роста)

природоохранных технологий<sup>10</sup>, а в итоге — добиться одновременного улучшения экономико-экологических ситуаций на обеих территориях.

Результаты экспериментов показывают, что повышение ставок экологических налогов до уровня европейских<sup>11</sup> сначала приводит к вымиранию части популяции экономических агентов (причем в большей степени — эгоистов), а затем начинает оказывать позитивное влияние на развитие территории  $U$  и, как следствие, на развитие территории  $E$ . Наиболее заметно это на территории  $U$ . Спустя некоторое время загрязнение ОПС начинает здесь уменьшаться по сравнению с вариантом спонтанного развития. Теперь ежегодные темпы прироста загрязнения атмосферы составляют  $-2,9\%$ , водных ресурсов —  $-0,2\%$ , промышленными отходами —  $-1,4\%$ . Это вызывает увеличение численности населения и объемов производства по сравнению с вариантом спонтанного развития, причем как на территории  $U$  (рис. 4–5), так и на территории  $E$  (ежегодные темпы прироста промышленного производства возросли до  $1,6\%$  по сравнению с  $1,4\%$  при спонтанном развитии). Причина состоит в том, что повышение экологических налогов усиливает привлекательность альтруистического типа поведения: инвестиции в природоохранную деятельность на территории  $U$  начинают приносить большую выгоду, чем ранее. Однако, для того чтобы новые экологически чистые технологии стали массовыми, требуются подходящие условия (способность национальной инновационной системы генерировать и широко использовать новые технологии) и время. Причем последнего требуется тем больше, чем меньше в популяции было альтруистов, готовых инвестировать в зеленые технологии. В этом смысле территория  $U$  является заложником предшествующего развития (path dependence): сложившаяся структура популяции с доминированием эгоистов ( $\psi_U = 0,09$ ) хотя и меняется, но медленно (к концу расчетного периода соотношение альтруистов в популяции увеличилось, но незначительно — до  $\psi_U = 0,12$ ), что препятствует быстрому решению проблемы возросших издержек грязного поведения.

**Эксперимент 4. Регулирование коэволюции экономико-экологических популяций с помощью трансферта природоохранных технологий.** Идея состоит в том, чтобы расширить портфель природоохранных технологий, доступных на территории  $U$ , путем передачи в него более эффективных технологий, разработанных на территории  $E$ , и тем самым повысить выгоды от инвестиций в природоохранную деятельность<sup>12</sup>.

<sup>10</sup> Эти издержки экономические субъекты могут уменьшить посредством уклонения от налогов. Данное обстоятельство неявно учтено через параметризацию модели развития территории  $U$ , которая несет отпечаток ее институциональной среды и определяет способы и эффективность действий по уменьшению налоговых издержек, в том числе посредством уклонения от налогов или создания и внедрения технологических новшеств.

<sup>11</sup> В данном случае это приблизительно в 50 раз выше. Примерно во столько раз, по нашим оценкам, реальные (а не номинальные) ставки экологических налогов в 2005–2010 гг. были меньше в Украине, чем в Германии.

<sup>12</sup> Источники финансирования трансферта технологий в данном случае не учитываются, поскольку этот аспект не имеет принципиального значения для рассматриваемых в настоящей работе проблем.

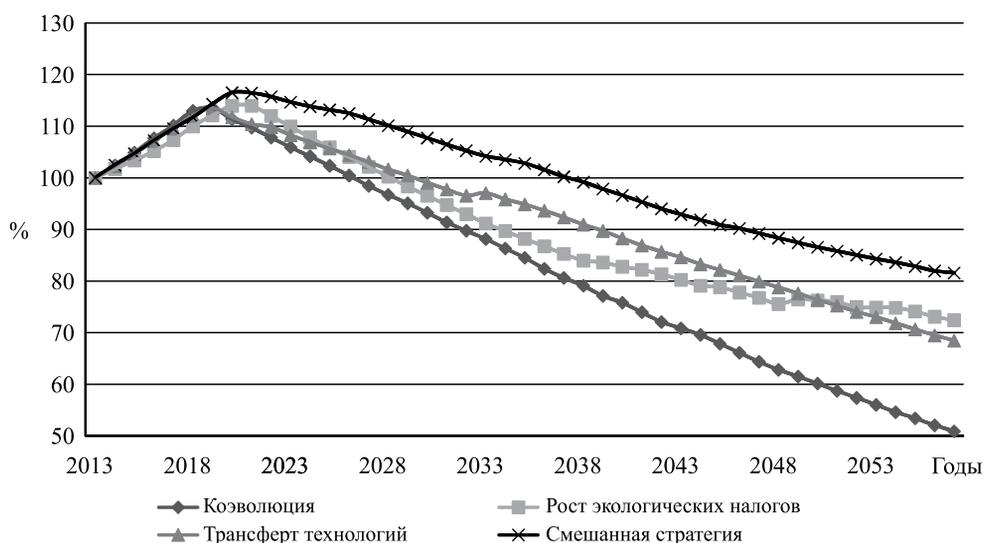


Рис. 5. Динамика объемов промышленного производства на территории  $U$  при разных экспериментах (базисные темпы роста)

Результаты экспериментов показывают, что трансферт технологий также оказывает позитивное влияние на экономико-экологическое состояние как территории  $U$ , так и территории  $E$ , но при этом положительные последствия наступают быстрее, чем в эксперименте 3 (см. рис. 4–5). Снижение темпов прироста загрязнения приводит к относительно быстрому увеличению объемов производства по сравнению с вариантом спонтанного развития и замедлению сокращения численности населения. Позитивные изменения наблюдаются и в структуре популяции (рис. 6).

Такие тенденции объясняются тем, что экономические субъекты (как альтруисты, так и эгоисты) могут получить новые технологии сразу, так что теперь их не нужно раскручивать с помощью комплекса «наука–производство». Таким образом, на территории  $U$  имеет место Парето-улучшение – выигрывают все экономические субъекты, а поэтому им нет смысла менять свое поведение. Но экономическое Парето-улучшение в данном случае оборачивается эволюционным ухудшением – структура популяции не меняется по сравнению с экспериментом, предусматривающим повышения ставок экологических налогов ( $\psi_U = 0,09$ ). Получается так, что критерий Парето противоречит в данном случае эволюционному критерию устойчивого развития, поскольку с эволюционных позиций важно не просто получить текущие экономические выгоды, а сформировать институты, которые дадут преимущества в долгосрочной перспективе<sup>13</sup>. Со временем (см. рис. 4–5) улучшенная институциональная структура и наличие навыков самостоятельного решения экологических проблем начинает приносить свои плоды – кривая объемов производства эксперимента 3 пересекает кривую объемов эксперимента 4 и начинает занимать более высокие позиции.

**Эксперимент 5. Регулирование коэволюции экономико-экологических популяций с помощью смешанного воздействия.** Идея этого эксперимента состоит в том, чтобы повысить издержки

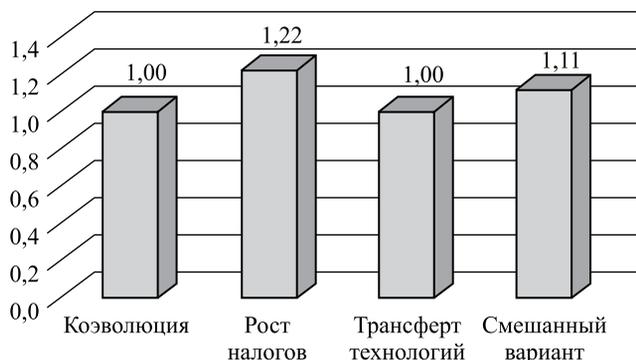


Рис. 6. Темпы роста доли альтруистов в общем объеме популяции территории  $U$  (в среднем за рассматриваемый период по сравнению с базовым вариантом)

<sup>13</sup>Это возвращает нас к старой идее о том, что главная функция власти (государства) заключается не просто в повышении ВВП и благосостояния граждан, а в защите и обеспечении воспроизводства народа, нации, что предполагает постановку и достижение качественно иных целей, чем рост ВВП.

**Таблица 2.** Основные показатели развития территорий (2013–2058 гг.) при разных экспериментах

Эксперимент	Территория <i>U</i>				Территория <i>E</i>				Средний индекс, доли единицы
	Объем производства		Численность населения		Объем производства		Численность населения		
	Темп роста, %	Индекс*, доли единицы	Темп роста, %	Индекс*, доли единицы	Темп роста, %	Индекс*, доли единицы	Темп роста, %	Индекс*, доли единицы	
Козволюция	98,97	1	98,06	1	102,10	1	99,39	1	1
Повышение налогов	99,61	1,0064	98,81	1,0077	102,33	1,0019	99,39	1,0000	1,0040
Передача технологий	99,58	1,0061	99,01	1,0097	102,15	1,0002	99,39	1,0000	1,0040
Смешанный	99,93	1,0097	99,39	1,0136	102,28	1,0014	99,39	1,0000	1,0061

**Примечание.** В таблице символом «\*» отмечено отношение темпов роста показателя соответствующего эксперимента к темпу роста показателя эксперимента по козволюции.

грязного поведения экономических субъектов на территории *U*, но не сразу, а после расширения их природоохранного портфеля путем передачи в него более эффективных технологий, разработанных на территории *E*.

Как показано на рис. 4 и 5, такое смешанное воздействие приносит лучшие результаты как по критерию численности населения, так и по критерию объемов производства продукции (табл. 2). Инвестирование в развитие природоохранных технологий, стимулированное посредством повышения экологических налогов, дает теперь большую отдачу, а поэтому вымирание предприятий-неудачников имеет меньшие масштабы, чем в эксперименте 3. Это свидетельствует о том, что:

1) для стран с развитыми национальными инновационными системами повышение экологических требований к производственным процессам и их продуктам не является такой сложной проблемой, как для стран, которые не обладают такими инновационными системами;

2) внешняя помощь таким странам в развитии природоохранных технологий может иметь значительный общесистемный (для обеих популяций) эффект;

3) не существует универсальных рецептов регулирования козволюции популяций, и в каждом конкретном случае требуется подбирать свои пропорции наказаний и поощрений, которые, с одной стороны, будут формировать новую институциональную структуру с более благоприятными для экологии правилами поведения экономических агентов, а с другой – не будут иметь характера шоковой терапии.

## ВЫВОДЫ

1. Для исследования закономерностей устойчивого развития в условиях углубления международного разделения труда и интенсивного формирования новых GVC в статье предложено использовать эволюционную методологию и концепцию экономико-экологических популяций, объединяющих экономических субъектов (предприятия) и население отдельных территорий. Интеракторами в популяциях являются предприятия, а единицами наследственности (репликаторами) – организационные рутины, формирующие устойчивые паттерны поведения предприятий: эгоистический – предрасположенность игнорировать ущерб, наносимый ОПС, и альтруистический – предрасположенность учитывать в своей деятельности ущерб ОПС.

2. Тенденции развития экономико-экологических популяций предложено воспроизводить с помощью системно-динамической агентной модели, имитирующей их эволюционное развитие, в которой каждая популяция имеет свою исходную структуру экономических субъектов, определяемую соотношением предприятий-эгоистов и предприятий-альтруистов. При этом для популяции, специализирующейся на производстве конечной продукции с низкими издержками для

ОПС, характерен высокий удельный вес предприятий-альтруистов, а для популяции, специализирующейся на производстве промежуточной продукции с высокими издержками для ОПС, – высокий удельный вес предприятий-эгоистов.

3. Указанная модель предназначена не просто для описания количественного роста экономики, а для анализа процессов ее эволюции в форме изменения исходной структуры экономических субъектов (предприятий-эгоистов и предприятий-альтруистов), что определяет изменение доминирующих институтов во времени и пространстве. Такой анализ позволяет обосновывать выбор путей достижения устойчивого развития через регулирование коэволюции экономико-экологических популяций.

4. Моделирование процессов коэволюции экономико-экологических популяций показало, что спонтанное развитие может иметь устойчивые негативные последствия для всей системы, обусловленные тем, что проблемы предприятий экологически неблагополучной территории через цепочки поставок переносятся на других участников создания стоимости, расположенных на благополучной территории. Для того чтобы избежать такого неблагоприятного развития событий, чреватого усилением глобальной нестабильности, процессы коэволюции следует регулировать.

5. Результаты вычислительных экспериментов свидетельствуют о том, что для обеих популяций регуляторные меры, направленные на поощрение чистого поведения субъектов экологически неблагополучной территории посредством введения дополнительных стимулов (наказаний и поощрений), могут иметь положительный системный эффект. Однако действенность регулирования может существенно различаться в зависимости от того, какие избраны способы воздействия.

6. В статье исследовались три способа воздействия на коэволюцию популяций: первый – это повышение относительных издержек грязного поведения экономических субъектов на экологически неблагополучной территории посредством усиления экологического налогообложения; второй – повышение относительных выгод чистого поведения экономических субъектов посредством трансферта на эту территорию более эффективных технологий очистки загрязнений; третий – смешанное воздействие, предполагающее некоторую комбинацию наказаний и поощрений.

Если применять первый способ через повышение экологических налогов, он приносит относительно медленные, но зато более надежные результаты, связанные с обучением популяции самостоятельному решению проблем устойчивого развития и постепенным изменением в ней доминирующих институтов. Медленные – по причине *path dependence* и того, что инновационная система неблагополучной территории хуже приспособлена к быстрому и эффективному решению проблем создания и последующего применения новых решений в области зеленых технологий.

Второй способ, предусматривающий трансферт эффективных природоохранных технологий, дает более быстрые, но зато менее надежные результаты, связанные с тем, что экономическим субъектам предоставляется возможность использовать выгоды устойчивого развития, но только за счет адаптации инструментов, полученных извне, которые могут быть «second-hand» и подверженными различным институциональным ограничениям (например, в связи с политически мотивированными санкциями со стороны более развитых в технологическом отношении государств). Поэтому принципиальное значение имеет не просто повышение эффективности природоохранной деятельности, а изменение доминирующих институтов, способное изменить отношение данной популяции к проблемам экологии.

С этих позиций более перспективным способом регулирования коэволюции эколого-экономических популяций является смешанный – начинать с поощрений через предоставление доступа к новым технологиям, повышая тем самым общую эффективность природоохранной деятельности на неблагополучной территории, а затем постепенно усиливать наказания, подталкивая экономических субъектов к изменению паттернов поведения и развитию собственной инновационной системы, способной генерировать эффективные решения экологических проблем. Наилучшие параметры такой комбинации необходимо подбирать для каждой страны индивидуально, в зависимости от специфики местных условий: исторически сложившейся структуры популяции (соотношения предприятий-альтруистов и предприятий-эгоистов), исходной величины издержек грязного поведения для экономических субъектов и способности популяции адаптировать известные, а также создавать и широко применять новые технологии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дементьев В.** (2006). Ловушка технологических заимствований и условия ее преодоления в двухсекторной модели экономики // *Экономика и математические методы*. Т. 42. № 4. С. 17–32.
- Дементьев В.** (2009). Догоняющее развитие через призму теории «длинноволновой» технологической динамики: аспект «окон возможностей» в кризисных условиях // *Российский экономический журнал*. № 1–2. С. 34–48.
- Becker M.** (2008). *Handbook of Organizational Routines*. M.C. Becker (ed.). Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Bergh J. van den, Hofkes M.** (ed.) (2010). *Theory and Implementation of Economic Models for Sustainable Development*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers.
- Bonabeau E.** (2002). Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems // *PNAS*. Vol. 99(3). P. 7280–7287.
- Bosetti V.** (ed.) (2009). *Modelling Sustainable Development: Transitions to a Sustainable Future*. Bosetti V., Gerlagh R., Schleicher S. (eds.). Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Forrester J.** (1970). *World Dynamics*. Portland, Oregon: Productivity Press.
- Forrester J.** (2007). System Dynamics – a Personal View of the First Fifty Years // *System Dynamics Review*. Vol. 23(2–3). P. 345–358.
- Gual M., Norgaard R.B.** (2010). Bridging Ecological and Social Systems Coevolution: A Review and Proposal // *Ecological Economics*. No. 69. P. 707–717.
- Kallis G., Norgaard R.B.** (2010). Coevolutionary Ecological Economics // *Ecological Economics*. No. 69. P. 690–699.
- Kuhndt M., Tessema F., Herrndorf M.** (2008). Global Value Chain Governance for resource Efficiency Building Sustainable Consumption and Production Bridges Across the Global Sustainability Divides // *Environmental Research, Engineering and Management*. Vol. 3. No. 45. P. 33–41.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J.** (1992). *Beyond the Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future*. Post Mills, Vermont: Chelsea Green.
- Nelson R., Winter S.** (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press.
- Safarzynska K., Bergh J. van den** (2010). Evolutionary Models in Economics: a Survey of Methods and Building Blocks // *Journal of Evolutionary Economics*. Vol. 20. No. 3. P. 329–373.
- Wiedmann T.** (2009). A Review of Recent Multi-Region Input-Output Models Used for Consumption-Based Emission and Resource Accounting // *Ecological Economics*. No. 69. P. 211–222.

Поступила в редакцию  
29.03.2016 г.

## REFERENCES (with English translation or transliteration)

- Becker M.** (2008). *Handbook of Organizational Routines*. M.C. Becker (ed.). Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Bergh J. van den, Hofkes M.** (ed.) (2010). *Theory and Implementation of Economic Models for Sustainable Development*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers.
- Bonabeau E.** (2002). Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems. *PNAS*, 99(3), 7280–7287.
- Bosetti V.** (ed.) (2009). *Modelling Sustainable Development: Transitions to a Sustainable Future*. Bosetti V., Gerlagh R., Schleicher S. (eds.). Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Dementiev V.** (2006). Trap of the Technological Dependence and Condition of Its Overcoming in Two-Sector Model of Economy. *Economics and Mathematical Methods* 42, 4, 17–32 (in Russian).
- Dementiev V.** (2009). Catching-up Development Through the Prism of the Theory of “Long-Wave” Technological Dynamics: the Aspect of “Opportunity Windows” under Crisis. *Russian Economic Journal* 1–2, 34–48 (in Russian).
- Forrester J.** (1970). *World Dynamics*. Portland, Oregon: Productivity Press.
- Forrester J.** (2007). System Dynamics – a Personal View of the First Fifty Years. *System Dynamics Review* 23(2–3), 345–358.

- Gual M., Norgaard R.** (2010). Bridging Ecological and Social Systems Coevolution: A Review and Proposal. *Ecological Economics* 69, 707–717.
- Kallis G., Norgaard R.B.** (2010). Coevolutionary Ecological Economics. *Ecological Economics* 69, 690–699.
- Kuhndt M., Tessema F., Herrndorf M.** (2008). Global Value Chain Governance for resource Efficiency Building Sustainable Consumption and Production Bridges Across the Global Sustainability Divides. *Environmental Research, Engineering and Management* 3, 45, 33–41.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J.** (1992). *Beyond the Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future*. Post Mills, Vermont: Chelsea Green.
- Nelson R., Winter S.** (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press.
- Safarzynska K., Bergh J. van den** (2010). Evolutionary Models in Economics: a Survey of Methods and Building Blocks. *Journal of Evolutionary Economics* 20, 3, 329–373.
- Wiedmann T.** (2009). A Review of Recent Multi-Region Input-Output Models Used for Consumption-Based Emission and Resource Accounting. *Ecological Economics* 69, 211–222.

Received 29.03.2016

## REGULATING CO-EVOLUTION OF THE ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL POPULATIONS IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

A. V. Polovyan<sup>i</sup>, E. N. Vishnevskaya<sup>ii</sup>

**Abstract.** New industrialization in the world and formation of new global industrial structure exacerbate the problem of sustainable development as environmentally friendly development of one countries is often reached due to pollution of others. And it eventually creates problems for everyone, the solution of which requires international regulation. To justify the ways of such regulation the mathematical model is constructed. The model describes the interaction of the two economic and ecological populations presented by sets of enterprises and population of the separate territories which differ in the dominating production technologies, patterns of behavior of economic agents and ecological consequences of their activities. Parameterization of the model made on the basis of indicators for the Germany (an example of ecologically clean territory) and Ukraine (an example of ecologically unfavorable territory). The experiments with the model allowed us to estimate the effectiveness of three different ways of regulating their coevolution with the aim of mitigating ecological problems: 1) punishment in the form of higher relative costs of the “dirty” behavior of economic agents in the ecologically unfavorable territories through the strengthening of environmental taxation, 2) rewards in the form of an increase of the relative benefits of the “clean” behavior of economic agents through a transfer to the territory of more efficient technologies for pollution’s treatment, 3) the mixed impact, suggesting some combination of punishments and rewards. The simulation showed that the best results are obtained by the mixed impact when regulation starting with the rewards through the provision of access to new technologies, thus increasing the overall effectiveness of environmental management on a disadvantaged territory, and then gradually strengthening penalties, pushing economic agents to change their behavior patterns and to develop their own innovation system, capable of generating effective technological solutions to environmental problems.

**Keywords:** coevolution, ecological-economic population, system dynamics, agent-based modeling, economic regulation.

**JEL Classification:** C63, O33, Q56.

<sup>i</sup>**Aleksei V. Polovyan** – Doctor of Science (Economics), Associate professor, Director, SU “Institute of Economic Research”, Donetsk; polovyan@yandex.ru.

<sup>ii</sup>**Elena N. Vishnevskaya** – Candidate of Science (Economics), Associate professor of the economic theory and public administration, Donetsk National Technical University, Donetsk; vishn.elena@gmail.com.