3. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

3.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОЙ ДИНАМИКИ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ[1]

Акопов А.С., д.т.н., профессор,
кафедра Бизнес-аналитики;
Хачатрян Н.К., к.ф.-м.н., доцент,
кафедра Бизнес-аналитики;
Фомин А.В., к.э.н., доцент,
кафедра Бизнес-аналитики

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва

Перейти на ГЛАВНОЕ МЕНЮ

В статье представлен подход к моделированию равновесной динамики эколого-экономической системы на примере Республики Армения (РА). Изучены такие важные характеристики как динамика общих выбросов, доля улавливаемых вредных веществ, численность диагностированных заболеваний и др. Представлена разработанная имитационная модель эколого-экономической системы РА, разработанная с использованием методов системной динамики и агентного моделирования. Исследованы сценарии, при которых обеспечивается сокращение выбросов за счет перехода системы к состоянию равновесия на внутреннем рынке за счет выбора эффективных ставок платы за выбросы со стороны государства.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в области экологической политики имеется несколько принципиальных проблем.

Во-первых, при оценке возможностей по сокращению выбросов необходимо учитывать имеющиеся обратные связи и сложные нелинейные зависимости, в частности, между инвестициями в основной капитал в том числе, модернизацию агентов-предприятий и доли улавливаемых и обезвреженных вредных веществ, между объемами выбросов вредных веществ (по видам) и количеством диагностированных заболеваний (прежде всего болезней органов дыхания, болезней кожи и подкожной клетчатки и других болезней, связанных с выбросами). Поэтому для моделирования эколого-экономических систем необходимо применять методы *системной динамики* [1, 2, 7, 8, 13, 14] в комбинации с методами агентного моделирования [4, 5, 9], позволяющие учесть влияние поведения экономических агентов, в частности, предприятий, являющихся основными стационарными источниками выбросов.

Во-вторых, многие агенты-предприятия не заинтересованы в сокращении выбросов. Поэтому к ним применяется экологическое регулирование, в частности, платежи за загрязнение, в том числе выбросы вредных веществ в атмосферу. Однако на практике система платежей, основанная на дифференцированной тарификации выбросов, превышающих и не превышающих предельно допустимые значения, оказывается недостаточно эффективной. Одним из направлений повышения мотивации экономических агентов к снижению выбросов может создать формирование внутреннего рынка сбыта продуктов переработки вредных веществ. В качестве примера можно указать *выбросы диоксида серы* (SO_2), которые можно переработать в серу, серную кислоту и сульфаты с последующей реализацией на внутреннем рынке.

Также имеется известная проблема дефицита инвестиционного капитала, направляемого, в частности, на модернизацию основных производственных фондов, в том числе строительство очистных, газоулавливающих и газоперерабатывающих сооружений. Особенно данная проблема характерна для Республики Армения, основным источником инвестиций которой является внешний мир. Поэтому к отдельным агентам-предприятиям, существенно нарушающим предельно допустимые нормы выбросов, необходимо применять жесткое экологическое регулирование, в частности, предполагающее полную или частичную (т.е. применяемую к отдельным источникам выбросов) консервацию.

Таким образом, для моделирования динамики эколого-экономических систем требуется разработка специального экономико-математического инструментария, позволяющего вычислять значения квот на выбросы вредных веществ (в частности, CO_2), обеспечивающих достижение состояния устойчивого равновесия с поддержкой механизма оптимального внутреннего перераспределения квот между экономическими агентами эколого-экономической системы на индивидуальном (страновом) уровне.

Подобный инструментарий, основанный на использовании методов системной динамики и агентного моделирования, был разработан и апробирован на примере Республики Армения (РА) и может применяться к другим региональным эколого-экономическим системам для определения эффективной стратегии государственного экологического регулирования.

Методология моделирования и анализа динамики выбросов

Моделирование динамики выбросов вредных веществ представляет собой сложную задачу, требующую реализации механизма перехода эколого-экономической системы к состоянию равновесия с учетом влияния платежей за выбросы.

Согласно экономической теории [10], для снижения уровня выбросов государству достаточно линейно увеличить платежи за выбросы и равновесие установиться в новой условной точке ***E'*** (рис. 1).

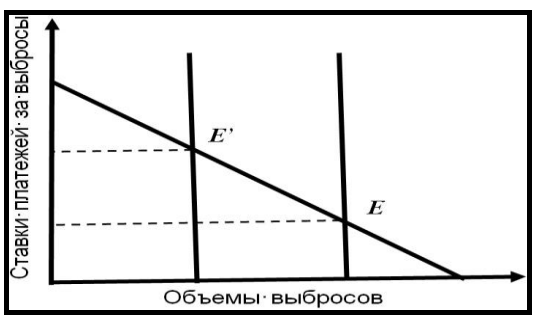

Рис. 1. Условная зависимость объемов выбросов от ставок платы за выбросы

Однако на практике переход к новому равновесному состоянию является нелинейным. У *агентов-предприятий*, являющихся стационарными источниками выбросов, имеется возможность нарушать лимиты на выбросы. Кроме того, финансовые ре-

[1] Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №15-51-05011 «Разработка методов, моделей и комплекса программ для оптимального управления динамикой агентов эколого-экономической системы Республики Армения».

сурсы агентов-предприятий могут быть ограничены, поэтому вместо инвестиций в сокращение выбросов в необходимом объеме они вполне могут допустить частичное нарушение предельно допустимых уровней выбросов. В этом случае для снижения выбросов необходимо создавать дополнительные стимулы, в частности, в виде рынка продуктов переработки выбросов (например, SO_2 – в серную кислоту, CO_2 – в пищевой сжиженный углеводород и т.д.). Таким образом обеспечивается механизм перехода эколого-экономической системы к состоянию частичного равновесия за счет увеличения доли улавливания, утилизации и обезвреживания выбросов и получения дополнительной выручки от реализации продуктов переработки. При этом на каждом временном шаге государство выбирает новые значения платежей за выбросы. В свою очередь агенты-предприятия выбирают уровень выбросов и доли улавливаемых и утилизируемых выбросов соответственно. В случае наличия избыточного объема выбросов переход к равновесному состоянию достигается за счет повышения платежей за выбросы. Данный процесс может быть описан с помощью хорошо известной паутинообразной модели [11], представленной на рис. 2. Подобный подход часто используется для моделирования перехода систем к состоянию полного или частичного экономического равновесия [5, 6, 12, 15, 16].

Рис. 2. Динамика выбросов и платежей за выбросы в паутинообразной модели

Кривая цен (см. рис. 2) в данном случае показывает, как текущие платежи за выбросы (устанавливаемые агентом-государством) зависят от совокупного объема выбросов агентов-предприятий. Кривая отложенного выпуска показывает, как текущее предложение – объем выбросов – зависит от стоимости единицы выбросов в прошлом периоде. Таким образом, значения ставок платы за выбросы в прошлом периоде (по видам вредных веществ) определяют объемы соответствующих выбросов в текущем периоде, которые в свою очередь определяют текущие ставки платы за выбросы. В данной модели предполагается, что имеется положительная эластичность объемов выбросов по платам за выбросы.

Отметим, что экологическое регулирование, основанное на управлении ставками за выбросы, применяется во многих эколого-экономических системах, в частности, в Российской Федерации, РА и др., Например, в РА применяется Закон РА «О ставках природоохранительных платежей» от 29 апреля 2000 г. №ЗР-49, в котором зафиксированы ставки за выбросы по видам вредных веществ. Представляет интерес динамика выбросов углеводородов отдельных стран, в частности, РФ, Европейского союза, Индии и Китая в сравнении с РА за период с 1990 по 2013 г.[2] (рис. 3).

Рис. 3. Темпы изменения выбросов по отдельным странам и экономикам мира

На рис. 3 видно, что лидерами по темпам выбросов являются Индия и Китай (КНР). При этом в некоторых странах, в частности, в РА, наблюдается существенное снижение выбросов на интервале 1990-1997 г., что в основном связано с эффектом массовой приостановки и закрытия крупных промышленных предприятий, резким снижением уровня жизни населения (использования автотранспорта) и другими внутренними кризисными явлениями, с последующей стабилизацией динамики выбросов в 1997-2013 гг.

Рис. 4. Динамика численности промышленных предприятий и индекса физического объема промышленного производства в РА

На рис. 4 представлена динамика численности промышленных организаций и индекса физического объема промышленного производства в РА на том же временном интервале 1990−2013 г.[3] Видно, что,

[2] Статистические данные OECD Library.

[3] Данные Национальной статистической службы Республики Армения, подробнее см. http://www.armstat.am/

несмотря на значительный рост численности промышленных предприятий (с 767 в 1990 г. до 2 726 к 2013 г.), темпы роста физического объема промышленного производства остаются на достаточно низком уровне. Такая ситуация во многом обусловлена структурными особенностями экономики РА, когда вместо крупных промышленных предприятий (таких как завод «Наирит», Ереванский научно-исследовательский институт математических машин и др.), создаются промышленные предприятия преимущественно среднего масштаба, ориентированные на экологически чистую и высокотехнологичную продукцию (к примеру, в РА успешно функционируют около 400 ИТ-компаний).

Кроме того, в период с 2005 по 2008 г. в РА осуществлялись инвестиции в модернизацию предприятий, владеющих стационарными источниками выбросов вредных веществ (в основном на интервале), что отражено на графике динамики общих выбросов и доли улавливаемых вредных веществ в РА (рис. 5).

На рис. 5 видно, что в период с 2005 по 2008 г. доля улавливаемых и обезвреженных вредных веществ в общих выбросах выросла с 45% до 90%, что позволило сократить общие выбросы до уровня 34,4 тыс. т к 2008 г. Однако в последующий временной период доля улавливаемых выбросов неуклонно снижалась, что во многом обусловлено сокращением инвестиций в основной капитал, в том числе модернизацию очистительных сооружений (рис. 5).

Рис. 5. Динамика объемов выбросов вредных веществ и доли улавливаемых и обезвреженных вредных веществ в общих выбросах в РА

Представляет интерес тот факт, что в РА достаточно низкая доля утилизации и обезвреживания выбросов (менее 0,1% от общего объема), что свидетельствует фактически о значительном дефиците собственных мощностей по переработке и обезвреживанию газообразных выбросов.

На рис. 6 представлена динамика диагностированных в РА заболеваний, преимущественно связанных с выбросами вредных веществ в атмосферу. К подобным заболеваниям прежде всего относятся болезни органов дыхания, кожи, болезни нервной системы и некоторые другие.

Отметим, что доля болезней органов дыхания в общем количестве диагностируемых заболеваний в РА составляет порядка 40%, а доля заболеваний, связанных с вредными выбросами в атмосферу, более 70%. Безусловно, существуют и иные факторы, влияющие на динамику подобных болезней, не относящиеся напрямую к экологической ситуации (например, генетические особенности, возрастной состав населения, социальное обеспечение, состояние медицины и др.). Тем не менее, можно утверждать, что половина всех диагностированных заболеваний в определенной степени связаны с влиянием вредных выбросов.

Рис. 6. Динамика численности диагностированных заболеваний, вызванных преимущественно выбросами вредных веществ в атмосферу, тыс. ед.

Таким образом, задача минимизации вредных выбросов при сохранении максимально возможного роста валового внутреннего продукта (ВВП) является важнейшей задачей эколого-экономической системы РА. Поэтому предлагается разработка имитационной модели, учитывающей взаимовлияние таких характеристик, как соотношение выбросов к ВВП, динамика общих выбросов, доля улавливаемых вредных веществ, численность диагностированных заболеваний и др., с возможностью управления состоянием агентов-предприятий для определения наилучших сценариев развития эколого-экономической системы и определения оптимальных (равновесных) значений ставок платы за выбросы по видам выбросов.

Имитационная модель эколого-экономической системы РА

Отметим, что ранее в работе [3] была представлена укрупненная модель эколого-экономической системы РА, с помощью которой можно формировать план по оптимальной модернизации предприятий и прогнозировать долгосрочную динамику выбросов вредных веществ в атмосферу. На основе данной модели была разработана новая имитационная модель, которая имеет ряд важных особенностей:

- учитывается механизм перехода эколого-экономической системы к состоянию (частичного) квазиравновесия, реализуемый за счет изменения ставок платы за выбросы и централизованного управления состояния агентов-

предприятий со стороны государства с учетом реакции подобных предприятий на изменение собственной прибыли;

- обеспечивается возможность расчета оптимальных значений ставок платежей за выбросы по видам вредных веществ, являющихся результатом перехода эколого-экономической системы к квазиравновесному состоянию;
- оценивается влияние снижения выбросов на важные социально-экономические показатели, в частности, численность некоторых диагностированных заболеваний, индекс физического объема промышленного производства и др.

Укрупненная схема разработанной имитационной модели эколого-экономической системы РА представлена на рис. 7.

Рис. 7. Разработанная имитационная модель

На рис 6 видно, что для построения имитационной модели эколого-экономической системы РА используется известный алгоритм нащупывания равновесия, реализуемый между государством и агентами-предприятиями, являющимися основными источниками выбросов. Первоначально государство формирует целевые значения выбросов вредных веществ в атмосферу с учетом реализуемости соответствующих значений (предложение). При этом могут учитываться многие факторы, например, предельно допустимые значения выбросов, взятые международные обязательства и др. С другой стороны, агенты-предприятия также формируют собственные предпочтения относительно возможных уровней собственных выбросов (спрос), которые, как правило, меньше либо равны текущим выбросам и зависят, в частности, от реакции агентов-предприятий на изменение собственной прибыли, зависящей от уровня платежей за выбросы. Равновесие достигается за счет изменений ставок платы за выбросы со стороны государства (в зависимости от наличия избыточных выбросов) и централизованного управления состояниями отдельных агентов-предприятий, в частности, их частичного либо полного закрытия.

Перейдем к формальному описанию разработанной имитационной модели. Введем следующие обозначения:

- $t \in \{t_0,\ t_0+1, \ldots, t_0+T\}$ – время по годам, t_0 – начальный год моделирования (2015 г.), T – горизонт стратегического планирования (10 лет);
- $i \in I(t)$ – индексы вредных веществ (например, CO_2, SO_2, ***NOx***, ***NMVOC*** и др.);
- $j \in J(t)$ – индексы агентов-предприятий, являющихся основными стационарными источниками выбросов вредных веществ;
- $\gamma_j(t) \in \{0,\ 0.5,\ 1\}$ – управляющий параметр (государства), устанавливаемый для всех j-х агентов-предприятий, и определяющий одно из их возможных состояний ($\gamma_j = 0$ – закрытие предприятия, $\gamma_j = 0{,}5$ – частичное закрытие, $\gamma_j = 1$ – исходное состояние);
- $\tilde{p}_i(t)$ – базовые ставки платы за выбросы i-х вредных веществ (известные для момента времени t_0), драм за 1 т;
- $v_{i,j}(t)$ – объемы выбросов i-х вредных веществ со стороны j-х агентов-предприятий, (известные для момента времени t_0);
- $\bar{v}_{i,j}(t)$ – предельно допустимые выбросы (ПДВ), устанавливаемые для каждого j-го агента-предприятия с учетом его особенностей (например, местоположения, наличия близко расположенных населенных пунктов и др.).

Ставки платы за выбросы i-х вредных веществ (драм за 1 т):

$$p_i(t) = \begin{cases} \tilde{p}_i(t), \text{ если } v_{i,j}(t) \le \bar{v}_{i,j}(t), \\ 3 * \tilde{p}_i(t), \text{ если } v_{i,j}(t) > \bar{v}_{i,j}(t), \end{cases} \quad (1)$$

$$i \in I(t),\ t \in \{t_0,\ t_0+1, \ldots, t_0+T\}.$$

Отметим, что в случае нарушения агентами-предприятиями ПДВ, применяется трехкратное значение ставки платы за выбросы (1).

Спрос на выбросы со стороны агентов предприятий:

$$d_{i,j}(t) = \gamma_j(t) \frac{d_{i,j}(t-1)}{\left(v_{i,j}(t) p_i(t) / v_{i,j}(t) p_i(t-1)\right)^{\xi_{i,j}}}, \quad (2)$$

$$i \in I(t),\ j \in J(t),$$

где $\xi_{i,j}$ – эластичность спроса на выбросы (агентов-предприятий) по отношению к изменению ставок платы за выбросы (известная из статистики), $\xi_{i,j} > 0$ для всех $i \in I(t)$, $j \in J(t)$;

$d_{i,j}(t_0) = v_{i,j}(t_0)$ – известное начальное значение спроса на выбросы, равное текущему объему выбросов.

Целевые значения выбросов (предложение), желаемые для государства:

$$s_{i,j}(t) = \\ = \begin{cases} s_{i,j}(t-1) / \alpha_i, \text{ если } s_{i,j}(t-1) > \underline{v}_{i,j}(t), \\ \underline{v}_{i,j}(t), \text{ если } s_{i,j}(t-1) \le \underline{v}_{i,j}(t), \end{cases} \quad (3)$$

где $\underline{v}_{i,j}(t)$ – минимально возможные уровни выбросов, устанавливаемые для каждого j-го агента-предприятия (с учетом его специфики), соответствующие уровню малоотходного производства;

α_i – коэффициент снижения выбросов, устанавливаемый государством, $1 < \alpha_i$ для всех $i \in I(t)$.

Отметим, что согласно (3) сокращение выбросов, инициируемое государством, осуществляется до известного (ненулевого) уровня малоотходного производства. При этом дальнейшее уменьшение выбросов может свидетельствовать о фактической ликвидации предприятия, которая, как правило, не желательна для государства.

Совокупные выбросы агентов-предприятий:

$$V_i(t) = \sum_{j=1}^{J(t)} \gamma_j(t) v_{i,j}(t). \quad (4)$$

Платежи за выбросы агентов-предприятий:

$$C_j(t) = \sum_{j=1}^{J(t)} \gamma_j(t) v_{i,j}(t) p_i(t). \quad (5)$$

Динамика численности диагностированных заболеваний в РА описывается следующим уравнением:

$$D(t) = D(t-1) \log\left(\sum_{i=1}^{I(t)} a_i V_i(t)\right), \quad (6)$$

где $D(t-1)$ −численность диагностированных заболеваний в предыдущий момент времени;

a_i − коэффициент отражающий вклад каждого i-го вида выбросов в численность диагностированных заболеваний (определяется на основе анализа статистики с использованием метода наименьших квадратов), $a_i \geq 0,\ i \in I(t)$.

Динамика индекса физического объема промышленного производства:

$$I(t) = I(t-1) \log\left(b_1 \frac{\sum_{i=1}^{I(t)} V_i(t)}{\sum_{i=1}^{I(t)} V_i(t-1)} + b_2 \sum_{i=1}^{I(t)} V_i(t)\right), \quad (7)$$

где $I(t-1)$ − индекс физического объема промышленного производства в предыдущий момент времени;

b_1 − коэффициент, отражающий негативный вклад сокращения выбросов в физический объем промышленного производства (определяется статистически), например, вследствие закрытия предприятий или снижении объемов производства, приводящих к выбросам ($b_1 \geq 0$);

b_2 − коэффициент, отражающий позитивное влияние выбросов на объем производства, вследствие утилизации (переработки) данных выбросов (задается сценарно) ($b_1 \geq 0$).

Далее, представлено описание разработанной вычислительный процедуры, предназначенной для расчета общественно оптимальных (равновесных) ставок платы за выбросы вредных веществ. Данная процедура основана на хорошо известном алгоритме «нащупывания» равновесия [15], но имеет ряд важных особенностей.

Процедура определения равновесных ставок платы за выбросы

1. *Шаг 1.* Инициализация начальных значений: ставок платы за выбросы: $\tilde{p}_i^{q=0}(t) = \tilde{p}_i(t-1)$, $i \in I(t)$, спроса на выбросы: $d_{i,j}^{q=0}(t) = d_{i,j}(t-1)$, $i \in I(t)$, $j \in J(t)$, целевого уровня выбросов $s_{i,j}(t)$, фактического уровня выбросов $v_{i,j}(t)$ и управляющего параметра $\gamma_j^{q=0}(t) = 1$, $q = 1, 2, \ldots, Q$, (Q – максимальное количество итераций).
2. *Шаг 2.* $g_i^q(t) = \sum_{j=1}^{J(t)} \left(d_{i,j}^{q-1}(t) - s_{i,j}(t)\right)$ – избыточные выбросы.
3. *Шаг 3.* $\tilde{p}_i^q(t) = \tilde{p}_i^{q-1}(t) + \varepsilon g_i^q(t)$ – новые базовые ставки платы за выбросы, $i \in I(t)$. Здесь, ε – достаточно малое число ($\varepsilon = 1/Q$),
$$p_i^q(t) = \begin{cases} \tilde{p}_i^q(t), \text{ если } v_{i,j}(t) \leq \bar{v}_{i,j}(t), \\ 3 * \tilde{p}_i^q(t), \text{ если } v_{i,j}(t) > \bar{v}_{i,j}(t), \end{cases}$$
– новые ставки платы за выбросы.
4. *Шаг 4.* Расчет нового спроса на выбросы со стороны агентов-предприятий:
$$d_{i,j}^q(t) = \gamma_j^q(t) \frac{d_{i,j}^{q-1}(t)}{\left(v_{i,j}(t) p_i^q(t) / v_{i,j}(t) p_i^{q-1}(t)\right)^{\xi_{i,j}}}, \quad (8)$$
$i \in I(t)$, $j \in J(t)$.
5. *Шаг 5.* $q \leftarrow q+1$ и возврат к шагу 2, пока не выполнится хотя бы одно из условий: $\left|g_i^q(t)\right| \leq \omega$ для всех $i \in I(t)$, или $q = Q$ (где ω – достаточно малое число).
6. *Шаг 6.* Если $q = Q$ и имеет место ненулевой избыточный спрос $\left|g_i^q(t)\right| > \omega$ хотя бы для одного $i \in I(t)$, то последовательное отключение агентов-предприятий, имеющих максимальный спрос на выбросы:
$$\gamma_j^q(t) = \begin{cases} \gamma_j^{q-1}(t) - 0.5, \text{ если } \gamma_j^{q-1}(t) > 0 \text{ и } d_{i,j}^q \geq d_{i,\tilde{j}}^q,\ j \notin \tilde{j}, \\ \gamma_j^{q-1}(t), \text{ если } \gamma_j^{q-1}(t) = 0. \end{cases} \quad (9)$$
$q \leftarrow 1$ и возврат к шагу 2.
7. **Шаг 7.** Результат алгоритма равновесные ставки платы за выбросы и спрос на выбросы со стороны агентов-предприятий: $\hat{p}_i(t) = \tilde{p}_i^q(t)$, $\hat{d}_{i,j}(t) = d_{i,j}^q(t)$.

Отметим, что важной особенностью предложенной вычислительной процедуры является последовательное закрытие агентов-предприятий, реализуемое на шаге 6 при условии невозможности достижения равновесного состояния за счет исключительно изменения ставок платы за выбросы.

Вычисленные с помощью предложенного алгоритма ставки платы за выбросы и спрос на выбросы используются в имитационной модели для прогнозирования динамики других важных показателей эколого-экономической системы, в том числе совокупных выбросов вредных веществ (равных суммарному равновесному спросу на выбросы), индекса физического объема выпуска, численности диагностированных заболеваний и др.

Компьютерная реализация модели эколого-экономической системы

Далее на основе предложенной модели эколого-экономической системы РА был разработан программный комплекс, представляющий собой имитационную модель, реализованную в системе ***AnyLogic***, интегрированной с многомерной базой данных системы (***MS SQL Server***), и позволяющую моделировать различные сценарии развития рассматриваемой эколого-экономической системы с визуализацией динамики важнейших показателей, а также динамики состояний агентов-предприятий на карте РА (рис. 8).

Отметим, что выбор ***AnyLogic*** в качестве платформы имитационного моделирования (ИМ) был обусловлен тем, что данная система поддерживает различные методы ИМ, в том числе методы системной динамики и агентного моделирования, интегрируется с геоинформационными системами (ГИС), базами данных и другими подсистемами, используя технологические возможности языка программирования ***Java*** [1].

Отметим, что в данной модели значения большинства констант, в частности, коэффициентов α_i, a_i, b_1, b_2, Q и др. выведены в интерфейс управления моделью (рис. 7). Другие параметры, в частности, $\underline{v}_{i,j}(t)$, $\bar{v}_{i,j}(t)$ ($i \in I(t)$, $j \in J(t)$) и исходные данные, известные на момент времени t_0, хранятся в многомерной базе данных системы и загружаются в модель автоматически в процессе симуляции.

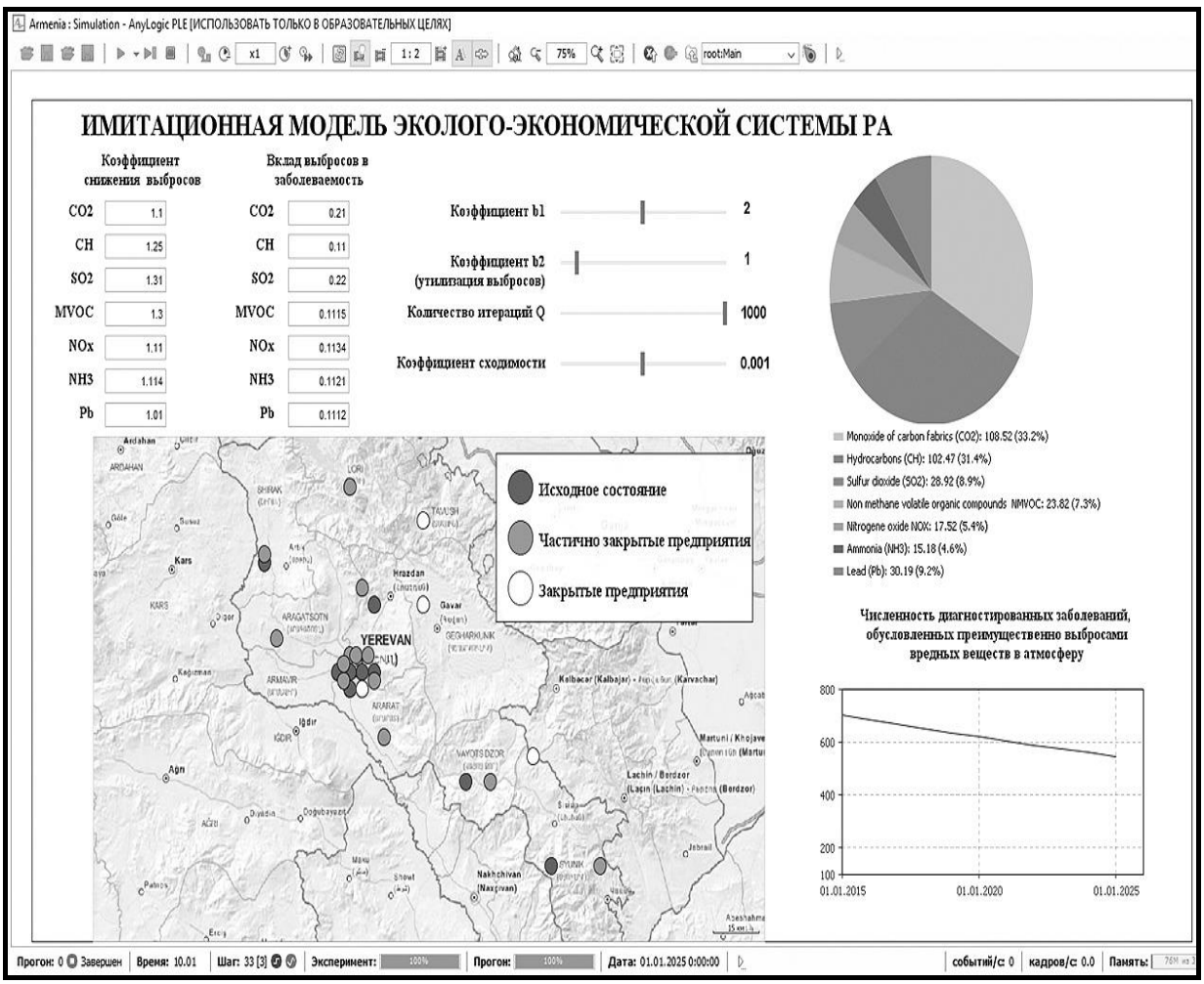

Рис. 8. Компьютерная реализация модели в AnyLogic

Результаты имитационного моделирования

С помощью разработанного программного комплекса был выполнен прогноз общественно оптимальных (равновесных) ставок платы на выбросы (табл. 1) в ***РА***, обеспечивающие двукратное снижение совокупных выбросов к 2025 г. при сохранении положительной динамики индексов физического объема промышленного производства. Кроме того, возможное снижение выбросов, обусловленное изменением ставок платы за выбросы в совокупности с частичным и полным закрытием отдельных предприятий, может привести к существенному сокращению численности диагностированных заболеваний в РА, обусловленных выбросами (табл. 1).

Таблица 1

ДИНАМИКА ПРОГНОЗИРУЕМЫХ РАВНОВЕСНЫХ СТАВОК ПЛАТЫ ЗА ВЫБРОСЫ (ДРАМ ЗА ТОННУ), ВЫЧИСЛЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И ЗНАЧЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РА

Вещества	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
Рассчитанные ставки за выбросы вредных веществ по видам (драм за 1 т)										
Пыль	600	1 080	1 836	2 387	4 296	4 296	4 296	4 296	4 296	4 296
CO	80	160	320	384	422	676	879	1 230	1 476	2 066
Окислы азота	7 400	14 060	16 872	23 621	23 621	23 621	23 621	23 621	23 621	23 621
SO2	600	720	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440
Толуол (C6H5CH3)	500	600	1 200	1 920	3 456	3 456	3 456	3 456	3 456	3 456
Хлор (Cl2)	6 000	11 400	18 240	27 360	38 304	38 304	38 304	38 304	38 304	38 304
Хлоропрен (C4H5Cl)	45 000	63 000	69 300	69 300	90 090	92 000	92 000	92 000	92 000	92 000
Окись хрома (CrO3)	18 957 000	18 957 000	18 957 000	18 957 000	18 957 000	18 957 000	18 957 000	18 957 000	18 957 000	18 957 000
Ксилол (C6H4(CH3)2)	1 500	2 400	4 320	5 616	6 178	9 266	14 826	26 687	26 687	26 687
Формальдегид (HCNO)	23 400	37 440	44 928	71 000	71 000	71 000	71 000	71 000	71 000	71 000
Ключевые показатели эколого-экономической системы РА										
Совокупные выбросы, тыс. т	135	130	127	112	93	82	69	65	60	59
Численность диагностируемых заболеваний (всего), тыс.	1000	1 060	1 124	1 080	1 029	935	850	810	750	701
Индекс физического объема промышленного производства	102,1	101,5	101,7	102,9	104	105,5	106	108	110	111

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана экономико-математическая модель эколого-экономической системы с реализацией на примере РА, которая позволяет решать различные задачи, относящиеся в основном к определению эффективной политики государственного экологического регулирования, в частности, определения равновесных значений ставок на выбросы вредных веществ, которые соответствуют общественно оптимальному уровню, т.е. обеспечивают снижение совокупных выбросов при сохранении положительных темпов роста физического объёма производства. В отличие от других подобных моделей, представленная система реализована в виде программного комплекса (на платформе имитационного моделирования ***AnyLogic***), с поддержкой визуализации динамики состояний агентов-предприятий на географической карте (РА). При этом обеспечивается механизм перехода эколого-экономической системы к состоянию квазиравновесия с учетом влияния различных управляющих параметров такой системы (например, доли утилизируемых выбросов, целевых темпов снижения выбросов и др.).

Литература

1. Акопов А.С. Имитационное моделирование [Текст] : учеб. и практикум для академического бакалавриата. – М. : Юрайт, 2014.
2. Акопов А.С. Системная динамика [Текст] : учеб.-метод. пособие / А.С. Акопов, Н.К. Хачатрян. – М. : ЦЭМИ РАН, 2014.
3. Акопов А.С. и др. Укрупненная модель эколого-экономической системы на примере Республики Армения [Текст] / А.С. Акопов, Л.А. Бекларян, А.Л. Бекларян, А.К. Сагателян // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6 ; №4. – С. 621-631.
4. Акопов А.С. и др. Многокритериальная оптимизация эколого-экономической системы: на примере Республики Армения [Текст] / А.С. Акопов, А.Л. Бекларян // Устойчивость и процессы управления : мат-лы III междунар. конф. (СПб., 5-9 окт. 2015 г.) / под общ. ред. А.П. Жабко, Л.А. Петросян. – СПб. : Изд. дом Федоровой Г.В., 2015. – С. 401-403.
5. Фомин А.В. Динамическая модель равновесия фармацевтического рынка [Текст] / А.В. Фомин, А.С. Акопов // Аудит и финансовый анализ. – 2013. – №5. – С. 151-157.
6. Фомин А.В. Моделирование динамики фармацевтического рынка с учетом государственного регулирования [Текст] / А.В. Фомин, А.С. Акопов // Аудит и финансовый анализ. – 2012. – №6. – С. 155-161.
7. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) [Текст] / Дж. Форрестер ; пер. с англ. ; под общ. ред. Д.М. Гвишиани. – М. : Прогресс, 1971.
8. Akopov A.S. Modelling the dynamics of the Smarter Region [Text] / A.S. Akopov, G. Beklaryan // Proceedings of 2014 IEEE Conference on computational intelligence for financial engineering & economics. – 2014. – Pp. 203-209.
9. Axelrod R. The complexity of cooperation: agent-based models of competition and collaboration [Text] / R. Axelrod. – Princeton: Princeton university press, 1997.
10. Coase R.H. The problem of social cost [Text] / R.H. Coase // Journal of law and economics. – 1960. – No. 3. – Pp. 1-44.
11. Ezekiel M. The cobweb theorem [Text] / M. Ezekiel // The quarterly journal of economics. – 1938. – Vol. 52 ; no. 2. – Pp. 255-280.
12. Johansen L. A multisectoral study of economic growth [Text] / L. Johansen. – Amsterdam : North Holland, 1960.
13. Meadows D.H. et al. The limits to growth: the 30-year update [Text] / D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers. – Chelsea green publishing, 2004. – 342 p.

14. Meadows D.H. et al. The limits to growth [Text] / D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens. – N.-Y. : Universe books, 1972. – 205 p.
15. Scarf H. The computation of economic equilibria [Text] / H. Scarf. – Yale university press, New Haven and London, 1984.
16. Taylor L. Structuralist CGE models [Text] / L. Taylor // Taylor L. Socially relevant policy analysis: structuralist computable general equilibrium models for the developing world. – Cambridge: MIT press, 1990. – Pp. 1-70.

Ключевые слова

Эколого-экономическая система; имитационное моделирование; равновесные модели; экологические платежи.

Акопов Андраник Сумбатович

Хачатрян Нерсес Карленович

Фомин Алексей Владимирович

РЕЦЕНЗИЯ

Статья д.т.н. Акопова А.С., к.ф.-м.н., Хачатряна Н.К. и к.э.н. Фомина А.В. «Моделирование равновесной динамики эколого-экономической системы на примере Республики Армения» посвящена весьма актуальной теме − разработке новой равновесной модели эколого-экономической системы на примере Республики Армения (РА) с реализацией в виде программного комплекса на платформе имитационного моделирования ***AnyLogic***.

Актуальность работы обусловлена высокой значимостью проблемы определения наилучшей стратегии развития эколого-экономических систем с учетом системы государственного экологического регулирования. Подобные системы характеризуются наличием нелинейных обратных связей и сложных взаимозависимостей между экономическими агентами (государством, производителями, населением и др.). К сожалению, в большинстве существующих равновесных моделей подобных систем такие зависимости учитываются весьма ограниченно (например, только для рынков товаров и услуг, труда и капитала и т.п.). Однако при этом не принимается во внимание индивидуальная реакция агентов-предприятий на рост экологических платежей, и порождаемый ими переход к новому квазиравновесному состоянию на внутреннем рынке выбросов вредных веществ. Поэтому разработка нового экономико-математического и компьютерного инструментария, предназначенного для поддержки принятия решений в подобных системах, весьма актуальна.

Научная и значимость работы заключается в следующем.

1. Разработана новая имитационная модель региональной эколого-экономической системы, учитывающей механизм ее перехода к состоянию частичного равновесия, и позволяющая оценивать влияние различных управляющих параметров (например, ставок платежей на выбросы) на динамику важнейших показателей такой системы.
2. Создан оригинальный программный комплекс, обеспечивающий реализацию имитационной модели эколого-экономической системы на платформе имитационного моделирования ***AnyLogic***, интегрированной с базой данных и геоинформационной системой для поддержки визуализации состояния агентов-предприятий на карте РА.

Отметим, что для проведения исследований авторы используют реальные статистические данные OECD Library, Национальной статистической службы РА и др. Проведен системный анализ существующего состояния эколого-экономической системы (на примере РА) и дан прогноз ее динамики до 2025 г. при условии реализации перехода системы к равновесному состоянию с одновременным двукратным снижением уровня выбросов вредных веществ в атмосферу.

Разработанный авторами экономико-математический инструментарий и программный комплекс могут быть рекомендованы для использования в органах государственного экологического регулирования при подготовке принятия стратегических решений, в частности, определении оптимальных значений ставок платежей за выбросы вредных веществ.

Считаю, что данная работа носит важный научный и практический характер и может быть опубликована в данном научном издании.

Бекларян Л.А., д.ф.-м.н., профессор, г.н.с. Центрального экономико-математического института Российской Академии наук, г. Москва.

Перейти на ГЛАВНОЕ МЕНЮ