

УДК: 519.6+004.94

Укрупненная модель эколого-экономической системы на примере Республики Армения

А. С. Акопов^{1,a}, Л. А. Бекларян^{2,b}, А. Л. Бекларян^{3,c}, А. К. Сагателян^{4,d}

¹Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
Россия, 105187, г. Москва, ул. Кирпичная, д. 33

²Центральный экономико-математический институт РАН,
Россия, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47

³Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
Россия, 105187, г. Москва, ул. Кирпичная, д. 33

⁴Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА,
Республика Армения, 0025, г. Ереван, ул. Абовяна, 68

E-mail: ^a aakopov@hse.ru, ^b beklar@cemi.rssi.ru, ^c abeklaryan@hse.ru, ^d ecocentr@sci.am

*Получено 28 июня 2014 г.,
после доработки 12 августа 2014 г.*

В настоящей статье представлена укрупненная динамическая модель эколого-экономической системы Республики Армения (РА). Такая модель построена с использованием методов системной динамики, позволяющих учесть важнейшие обратные связи, относящиеся к ключевым характеристикам эколого-экономической системы. Данная модель является двухкритериальной задачей, где в качестве целевого функционала рассматриваются уровень загрязнения воздуха и валовой прибыли национальной экономики. Уровень загрязнения воздуха минимизируется за счет модернизации стационарных и мобильных источников загрязнения при одновременной максимизации валовой прибыли национальной экономики. При этом рассматриваемая эколого-экономическая система характеризуется наличием внутренних ограничений, которые должны быть учтены при принятии стратегических решений. В результате предложен системный подход, позволяющий формировать рациональные решения по развитию производственной сферы РА при минимизации воздействия на окружающую среду. С помощью предлагаемого подхода, в частности, можно формировать план по оптимальной модернизации предприятий и прогнозировать долгосрочную динамику выбросов вредных веществ в атмосферу.

Ключевые слова: экологическое моделирование, системная динамика, многопараметрическая оптимизация, имитационное моделирование

The integrated model of eco-economic system on the example of the Republic of Armenia

A. S. Akopov¹, L. A. Beklaryan², A. L. Beklaryan³, A. K. Saghatelyan⁴

¹*National Research University Higher School of Economics, 33 Kirpichnaya street, Moscow, 105187, Russia*

²*Central Economics and Mathematics Institute RAS, 47 Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117418, Russia*

³*National Research University Higher School of Economics, 33 Kirpichnaya street, Moscow, 105187, Russia*

⁴*Center for Ecological-Noosphere Studies of the National Academy of Sciences RA, 68 Abovian street, Yerevan, 0025, Armenia*

Abstract. — This article presents an integrated dynamic model of eco-economic system of the Republic of Armenia (RA). This model is constructed using system dynamics methods, which allow to consider the major feedback related to key characteristics of eco-economic system. Such model is a two-objective optimization problem where as target functions the level of air pollution and gross profit of national economy are considered. The air pollution is minimized due to modernization of stationary and mobile sources of pollution at simultaneous maximization of gross profit of national economy. At the same time considered eco-economic system is characterized by the presence of internal constraints that must be accounted at acceptance of strategic decisions. As a result, we proposed a systematic approach that allows forming sustainable solutions for the development of the production sector of RA while minimizing the impact on the environment. With the proposed approach, in particular, we can form a plan for optimal enterprise modernization and predict long-term dynamics of harmful emissions into the atmosphere.

Keywords: ecological modeling, system dynamics, multi-objective optimization, simulation modeling

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 621–631 (Russian).

Введение

Проблема постоянного увеличения уровня загрязнения воздуха, сопряжённая с ростом мировой экономики и потребительского спроса является глобальной. Во многих странах мира (например, России, КНР, США, ЕЭС) существуют программы и институты по исследованию экологических проблем. Так, например, хорошо известна модель мировой экономики, разработанная Д. Медоуз и др. [Meadows et al., 1972] и опубликованная в 1972 году в докладе Римскому клубу. Следует отметить, что, несмотря на используемый авторами системный подход, учитывающий взаимосвязи между ключевыми характеристиками социально-экономической системы (численность населения, истощение природных ресурсов, загрязнение окружающей среды и др.), в первой модели не принимался во внимание фактор технологического прогресса и возможность качественной трансформации социально-экономической системы, например, изменение потребительских предпочтений в сторону экологического потребления. Поэтому в дальнейшем возник ряд работ [Meadows et al., 2004; Akimoto et al., 2008; Chi et al., 2009; Feng et al., 2003], посвященных корректировке первоначальных прогнозов. Тем не менее основная проблема заключается в лагированном воздействии состояния окружающей среды на социально-экономическую систему (и ее элементов) и практической необратимости (сверхбольшой инерционности) большинства процессов экосистемы («зеленые зоны можно быстро уничтожить, но их воссоздание требует годы . . .»). Таким образом, основной целью дальнейших разработок должно стать изучение и многопараметрическая оптимизация долгосрочной динамики характеристик экологической системы с обеспечением упреждающего управления.

В качестве примера рассматривается экологическая ситуация в Республике Армения (РА). В целом в РА наблюдается благоприятное состояние экосистемы. Этому способствует относительно небольшое количество крупных производственных предприятий, тепловых и гидроэлектростанций (ТЭС и АТЭС) и др. Значительная доля (до 80 %) загрязняющих выбросов в РА приходится на автотранспорт. Остальная доля — на стационарные промышленные объекты. Тем не менее, по такой важной характеристике, как выбросы диоксида серы (SO_2) (а также углеводородов CH) в атмосферу преимущественную долю (до 90 %) занимают именно промышленные предприятия¹.

Следует отметить, что во многих городах Армении среднегодовая концентрация пыли превышает предельно допустимые нормы. Так в Раздане и Арарате к обычной городской пыли добавляется цементная пыль, частички которой, попадая во влажную среду, например, бронхи человека или легкие, закупоривают альвеолы². Также имеется известная проблема повышенной концентрации диоксидами в столице РА, связанная с деятельностью химического предприятия «Наирит» и сжиганием различных бытовых отходов без использования фильтрационных средств.

Решение экологических проблем, относящихся, в частности, к минимизации уровня загрязнения воздуха, требует системного подхода, учитывающего как потребности экономики в промышленном производстве и транспорте, так и необходимость качественной трансформации производственных технологий и тотального перехода на так называемый экологический транспорт (например, электромобили, автомобили на газу, велосипедный транспорт, развитие внутренних железнодорожных перевозок и т. д.). При этом для оценки возможностей минимизации динамики уровня вредных выбросов необходимо учитывать стоимость подобной технологической трансформации, в том числе затраты на инфраструктуру, новую транспортную систему, приобретение и монтаж очистных фильтров и др. Рост инвестиций в модернизацию и развитие экологически чистых предприятий, обеспечивает формирование положительной обратной связи для сферы здравоохранения (увеличивается продолжительность жизни людей, снижается уровень

¹ <http://armstatbank.am/>

² http://old.express.am/4_07/ecology.html

заболеваемости населения, уменьшается смертность и др.), а также способствует развитию туристической отрасли. При этом устойчивое сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу приводит к существенному снижению заболеваемости населения и увеличению доли экономически активного населения за счет минимизации числа временно нетрудоспособных граждан. В конечном итоге, такая положительная экологическая динамика позволяет улучшить значения ключевых макроэкономических показателей. Справедливо и обратное, рост доли перерабатывающей промышленности (увеличение численности предприятий) без использования соответствующих экологических стандартов может привести к увеличению доли вредных выбросов и последующему ухудшению характеристик социально-экономической системы РА.

Одним из возможных подходов к решению рассматриваемой проблемы является построение системы класса «Smarter Region» (разумный регион), в основе которой используется разработанная динамическая макромоделю эколого-экономической системы, учитывающая в первую очередь уровень загрязнения воздуха как основной фактор экологической безопасности.

Целью настоящей статьи является разработка укрупненной динамической модели эколого-экономической системы и ее апробирование для РА с целью определения рациональных значений макрофакторов (таких, как количество стационарных и мобильных источников загрязнения, численность экологически чистых производств и др.), обеспечивающих минимизацию уровня загрязнения атмосферы при максимально возможном объеме выпуска.

Динамическая укрупненная модель эколого-экономической системы

Разработка динамической укрупненной модели эколого-экономической системы РА основана на эконометрическом подходе и методах системной динамики. В первую очередь, с использованием тестов Грейнджера [Granger, 1969] выявлены основные факторы, влияющие на уровень загрязнения воздуха в РА. При этом рассматриваемые факторы оказывают различное влияние на выбросы вредных веществ по видам (диоксид серы — SO_2 , оксиды азота — NO_x , оксиды углерода — CO_x и др.).

Основное внимание уделяется следующим характеристикам:

- Объем выбросов в атмосферу по видам (SO_2 , NO_x , NMVOC, CH и др.) — тонн в год.
- Количество стационарных источников загрязнения (крупных промышленных предприятий, ТЭС, ГЭС и др.).
- Количество мобильных источников загрязнения (легковых и грузовых автомобилей).
- Количество экологически чистых производственных предприятий и транспортных средств.
- Ограничения на темпы создания новых экологически чистых предприятий и др., обусловленные инвестиционными возможностями экономической системы;
- Численность населения занятого в экономике.
- Количество диагностированных заболеваний, вызываемых загрязнением окружающей среды (опухоль, легочные болезни, астматические заболевания, аллергия и др.) и их влияние на численность трудовых ресурсов.
- И др.

Построим когнитивную схему, описывающую прямые и обратные зависимости между рассматриваемыми характеристиками (рис. 1).

Следует отметить, что увеличение доли экологически чистых производств и экологически чистого транспорта возможно только при наличии соответствующих инвестиционных возможностей. Так, например, рассматриваемый в настоящее время проект строительства железной дороги

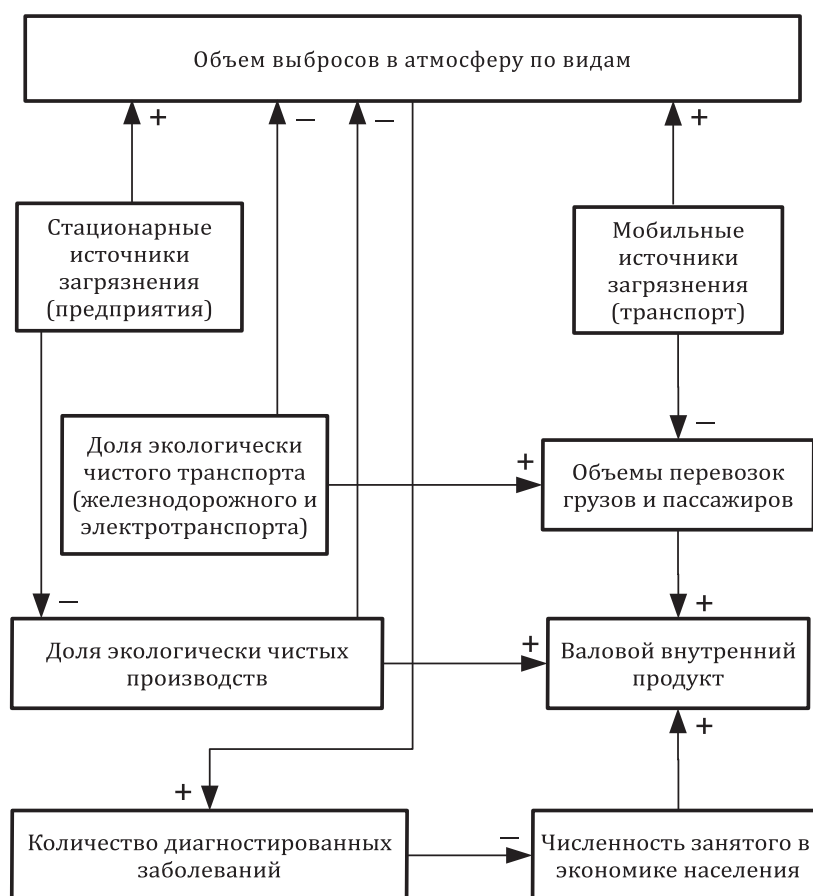


Рис. 1. Когнитивная схема модели эколого-экономической системы

Иран–Армения оценивается в 2–3.5 млрд. долл. США. С другой стороны, по объему потенциальных грузоперевозок подобное железнодорожное сообщение способно заменить практически весь ныне действующий на данном маршруте грузовой и автобусный транспорт, имеющие существенно худшие экологические характеристики. Повышение доли экологически чистых производств в экономике РА может быть достигнуто во многом за счет развития высокотехнологичного сельского хозяйства и пищевой промышленности, которому способствует наличие достаточной ресурсной базы и хорошие климатические условия.

Перейдем к формальному рассмотрению укрупненной модели эколого-экономической системы РА. Отметим, что в разработанной модели имеются несколько допущений. Первое существенное допущение состоит в использовании хорошо известной производственной функции типа Кобба–Дугласа для моделирования объема выпуска обеспечиваемого всеми предприятиями и транспортом. Второе — линейный учет вклада предприятий и транспорта в основные фонды национальной экономики. Третье — в модели не учитывается сложное влияние экологии на динамику смертности и рождаемости населения (однако оценивается количество заболеваний и соответственно число временно нетрудоспособных граждан).

Введем следующие обозначения:

$t \in \{t_0, t_0 + 1, \dots, t_0 + T\}$ — время по годам (T — горизонт стратегического моделирования);

$j \in \{1, 2, \dots, J(t)\}$ — индекс стационарного источника загрязнения (предприятия);

$k \in \{1, 2, \dots, K(t)\}$ — индекс мобильного источника загрязнения (транспорта);

$J(t), K(t)$ — общее количество всех предприятий и транспортных средств соответственно;

$\gamma_j(t) \in \{0, 1\}$ — управляющий параметр для j -х стационарных источников загрязнения: $\gamma_j(t) = 0$ означает ликвидацию j -го стационарного источника загрязнения посредством модернизации и перехода к экологически чистому производству, $\gamma_j(t) = 1$ означает сохранение j -го стационарного источника загрязнения в существующем состоянии (то есть отсутствие модернизации);

$\delta_k(t) \in \{0, 1\}$ — управляющий параметр для k -х мобильных источников загрязнения: принимаемые значения интерпретируется аналогично $\gamma_j(t)$;

$i \in \{1, 2, \dots, I\}$ — виды вредных веществ: SO_2 , NO_x , NMVOC , CH и др.;

$A(t)$ — объем выбросов вредных веществ в атмосферу

$$A(t) = \sum_{i=1}^I \left(\sum_{j=1}^{J(t)} \gamma_j(t) a_{ij} + \sum_{k=1}^{K(t)} \delta_k(t) b_{ik} \right), \quad (1)$$

где a_{ij}, b_{ik} — средний объем выбросов i -х вредных веществ в атмосферу j -ми стационарными источниками загрязнения (предприятиями) и k -ми мобильными источниками загрязнения соответственно (экзогенные данные);

$X_1(t), Y_1(t)$ — количество стационарных источников загрязнения (традиционных предприятий) и мобильных источников загрязнения (традиционных транспортных средств)

$$X_1(t) = \sum_{j=1}^{J(t)} \gamma_j(t), \quad Y_1(t) = \sum_{k=1}^{K(t)} \delta_k(t); \quad (2)$$

$X_2(t), Y_2(t)$ — количество экологически чистых предприятий и транспортных средств

$$X_2(t) = J(t) - \sum_{j=1}^{J(t)} \gamma_j(t), \quad Y_2(t) = K(t) - \sum_{k=1}^{K(t)} \delta_k(t); \quad (3)$$

$C(t)$ — затраты на модернизацию стационарных и мобильных источников загрязнения

$$C(t) = \sum_{j=1}^{J(t)} p_j(t)(1 - \gamma_j(t)) + \sum_{k=1}^{K(t)} q_k(t)(1 - \delta_k(t)), \quad (4)$$

где $p_j(t), q_k(t)$ — средние затраты на модернизацию одного j -го предприятия и k -го транспортного средства соответственно (экзогенные данные).

Динамика численности всех предприятий и транспортных средств имеет вид

$$J(t) = J(t-1) + \Delta J(t), \quad K(t) = K(t-1) + \Delta K(t), \quad (5)$$

где $\Delta J(t), \Delta K(t)$ — темпы создания новых предприятий и транспортных средств (экзогенные данные).

Динамика численности занятого в экономике населения имеет вид

$$L(t) = L(t-1) - \Delta L(t) + \widetilde{\Delta L}(t), \quad (6)$$

где $\Delta L(t)$ — изменение численности занятого в экономике населения вследствие повышения количества диагностированных заболеваний, обусловленных плохой экологией, а $\widetilde{\Delta L}(t)$ — темп притока новой рабочей силы за счет демографического фактора и миграции. При этом

$$\Delta L(t) = \eta L(t-1) A(t-1),$$

где η — известный коэффициент влияния экологии на количество заболевших и, соответственно, нетрудоспособных граждан.

$V(t)$ — динамика валового выпуска в денежном выражении. Рассчитывается с помощью производственной функции типа Кобба–Дугласа с выделением вклада предприятий и транспорта соответствующего типа в основные фонды национальной экономики:

$$V(t) = \left(\sum_{j=1}^{J(t)} (\Phi_j(t) + \tilde{\Phi}_j(t)) + \sum_{k=1}^{K(t)} (F_k(t) + \tilde{F}_k(t)) \right)^\alpha (L(t))^\beta, \quad (7)$$

где

$\alpha + \beta = 1$ — параметры производственной функции (экзогенные данные);

$\Phi_j(t), F_k(t)$ — основные фонды традиционных предприятий и транспортных средств соответственно (экзогенные данные);

$\tilde{\Phi}_j(t), \tilde{F}_k(t)$ — основные фонды экологически чистых предприятий и транспортных средств соответственно (эндогенные данные).

$P(t)$ — валовая прибыль национальной экономики с учетом затрат на модернизацию и оплату труда

$$P(t) = V(t) - C(t) - w(t)L(t), \quad (8)$$

где $w(t)$ — средняя заработная плата.

Постановка задачи.

В каждый момент времени t требуется максимизировать валовую прибыль национальной экономики при минимально возможных совокупных выбросах вредных веществ за счет модернизации предприятий и транспортных средств.

Формализация такой задачи имеет следующий вид.

$$\begin{cases} \max_{\gamma_j(t), \delta_k(t)} P(t) \\ \min_{\gamma_j(t), \delta_k(t)} A(t) \end{cases} \quad (9)$$

при ограничениях:

$$P(t) \geq \underline{P}(t), \quad (10)$$

$$\left(\sum_{j=1}^{J(t)} \gamma_j(t) a_{ij} + \sum_{k=1}^{K(t)} \delta_k(t) b_{ik} \right) \leq \overline{A_i(t)} \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, I, \quad t = t_0, t_0 + 1, \dots, t_0 + T,$$

где $\underline{P}(t)$ — минимально допустимая валовая прибыль национальной экономики, $\overline{A_i(t)}$ — предельно допустимый уровень вредных веществ в атмосфере. Отметим, что $\overline{A_i(t)}$ является известным и дифференцируется по видам соответствующих веществ.

Далее с использованием системы имитационного моделирования Powersim Studio была реализована динамическая модель эколого-экономической системы РА (рис. 2).

Особенностью системы имитационного моделирования Powersim Studio является возможность реализации потоковых моделей с обратными связями. С помощью потоков и системных уровней в рассматриваемой системе моделируется динамика формирования стационарных

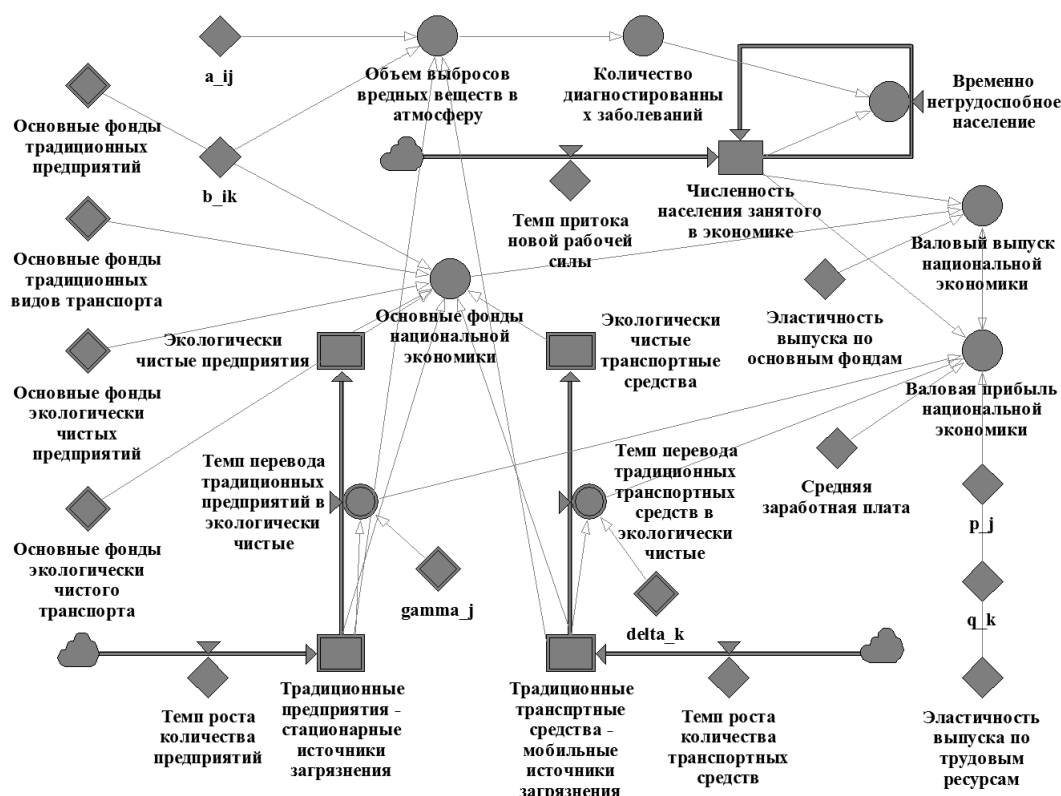


Рис. 2. Имитационная модель эколого-экономической системы в системе Powersim Studio

(традиционных предприятий) и мобильных источников загрязнения (традиционных транспортных средств), а также механизм их трансформации (перевода) в категорию экологически чистых предприятий и транспортных средств соответственно. Принципиальным отличием последних является практически нулевые выбросы вредных веществ в атмосферу. Примером подобных предприятий являются высокотехнологичные сельскохозяйственные производства, а также предприятия, имеющие специальные очистные сооружения.

Результаты имитационного моделирования

Важной целью имитационного моделирования являлось формирование рекомендаций по трансформации части предприятий РА, являющихся основными источниками загрязнения атмосферы, в категорию экологически чистых производств.

Задача (9)–(11) имеет множество решений оптимальных по Парето. Среди паретовских решений наиболее предпочтительными (с точки зрения предприятий) являются те решения по модернизации, которые можно максимально отложить во времени. Это и будет положено в основу правила выбора рационального решения на границе Парето.

Решение задачи (9)–(11) с использованием многоцелевого генетического алгоритма [Акопов, Невенцев, 2013] позволило определить пул предприятий, для которых необходима модернизация, а также оптимальный момент времени (год) перехода к экологически чистому производству.

Применяемый многоцелевой генетический алгоритм (MAGAMO) предназначен для поиска оптимальных по Парето решений в оптимизационных задачах большой размерности в си-

Таблица 1. Предприятия РА, требующие модернизации для перехода к экологически чистому производству

№	Категория	Предприятие	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	Первая группа	Завод «НАИРИТ»	м						
2		ЗАО «Dandy Precious Metals Каран»	м						
3		ЗАО «Зангезурский медно-молибденовый комбинат»	м						
4		ООО «ТОМШИНБЕТОН»	м						
5		ОАО «Комбинат Иджеванский бетонит»	м						
6		ООО «КАПАВОР» «Варденинский асфальто-бетонный узел»	м						
7		ЗАО «Манекс и Валлекс»	м						
8		ОАО «ЗАВОД ЧИСТОГО ЖЕЛЕЗА»	м						
9		ООО «АРМЕНИАН МОЛИБДЕН ПРОДАКШН»	м						
10		ЗАО «МИКА-ЦЕМЕНТ»	м						
11		ООО «ШИН-ТАВР»	м						
12		ОАО «АРАРАТШИНКОНСТРУКЦИЯ»	м						
13	Вторая группа	ООО «ВЕСТА»		м					
14		ЗАО «АРИКО ГОР»			м				
...								
38		ООО «КАРАСТАН»						м	
39	Третья группа	ООО «БАБНАР»							м
40		ООО «ГРИГОР»							м
...								м
94		ООО «Семер»							м

стемах имитационного моделирования. В основе данного алгоритма лежит хорошо известный алгоритм SPEA (Strength Pareto Algorithm) [Zitzler, Thiele, 1999], суть которого состоит в оценке так называемого ранга границы Парето («Парето сила») при проведении итерационной процедуры селекции наилучших (и недоминируемых) решений из имеющейся популяции для формирования множества решений на границе Парето наивысшего ранга. При этом особенностью MAGAMO является динамическое перераспределение пространства потенциальных решений между интеллектуальными агентами, представляющими собой самостоятельные генетические алгоритмы, функционирующие в параллельных вычислительных процессах. Такой подход позволяет принципиально повысить эффективность вычислительной процедуры поиска решений в многомерных имитационных моделях. Применение MAGAMO для рассматриваемой оптимизационной задачи обусловлено главным образом большой размерностью разработанной имитационной модели эколого-экономической системы (пространство потенциальных решений по модернизации, в частности, охватывает порядка 100 загрязняющих предприятий РА со своими характеристиками).

Вместе с тем получаемые с помощью MAGAMO решения визуализируются с помощью специализированных программных продуктов типа Pareto Front Viewer (PFV), которые, в свою очередь, имеют встроенные алгоритмы аппроксимации имеющихся данных. Выбор конкретного решения (сценария) по модернизации предприятий и транспортных средств осуществляется уже после визуализации оптимальных по Парето решений в PFV.

В качестве исходных данных были использованы данные Министерства охраны природы РА (в части экологических характеристик), а также данные Национальной статистической службы РА (в части макроэкономических показателей). Всего было проанализировано порядка 100 наиболее загрязняющих предприятий РА. Численное моделирование осуществлялось в диапазоне 2014–2020 гг. Результаты расчетов с применением решающего правила выбора на границе Парето представлены в таблице 1. При этом символ «м» означает необходимость модернизации, что соответствует значению управляющего параметра $\gamma_j(t) = 0$.

Все предприятия в таблице 1 классифицированы на три группы. Первая группа — предприятия, для которых требуется срочная модернизация (желательно в 2014 году) и перевод в категорию экологически чистых производств. Вторая группа — предприятия, которые должны быть модернизированы в течение 2015–2019 гг. И последняя группа — предприятия, которые могут быть модернизированы в последнем 2020 году (без значительного ущерба для экологии).

В результате рассчитанного с помощью имитационной модели рационального плана по модернизации предприятий РА, была спрогнозирована динамика выбросов вредных веществ в атмосферу (рис. 3).

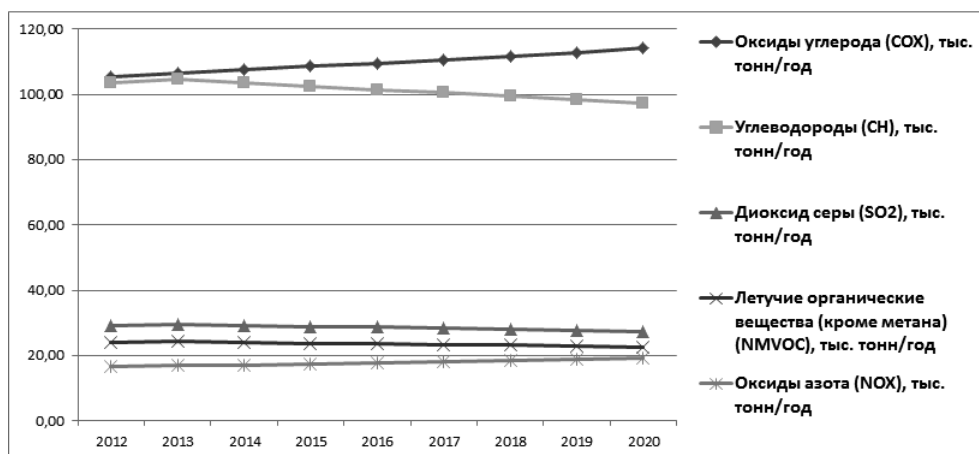


Рис. 3. Прогнозная динамика выбросов веществ в атмосферу РА при условии модернизации предприятий

Анализ показывает, что выбросы большинства вредных веществ могут быть снижены или стабилизированы.

Следует отметить, что несмотря на прогнозируемую в рамках рассматриваемой модели тенденцию к снижению выбросов большинства загрязнителей, ожидается рост выбросов диоксида углерода CO_2 , главным образом за счет увеличения количества традиционных транспортных средств (автомобилей). Вместе с тем динамика роста выбросов CO_2 может быть ограничена при условии реализации проекта строительства железнодорожного сообщения между Ираном и РА (и существенного увеличения доли железнодорожных перевозок соответственно).

Также отметим, что при прогнозировании динамики выбросов вредных веществ в атмосферу РА учитывался не только план по модернизации существующих предприятий, представленный в таблице 1, но также прогнозная динамика создания новых предприятий, задаваемая экзогенно. Таким образом, эффект от снижения выбросов был скорректирован с учетом развития традиционных отраслей экономики (в том числе, горнодобывающей, перерабатывающей, строительной и других).

Заключение

В представленной работе был продемонстрирован подход к укрупненному моделированию характеристик эколого-экономических систем, основанный на методах системной динамики. Спроектированная на основе данного подхода имитационная модель позволила выявить предприятия, являющиеся основными стационарными источниками загрязнения в Республике Армения. Данные объекты требуют немедленной модернизации и перевода в категорию экологически чистых производств.

В результате имитационного моделирования был сформирован план модернизации предприятий, обеспечивающий оптимизацию системы по двум важнейшим критериям — максимизация валовой прибыли национальной экономики при минимальном уровне выбросов вредных веществ. Результаты расчетов показывают, что выбросы большинства вредных веществ могут быть снижены или стабилизированы без ущерба (существенных затрат) для национальной экономики на длинном горизонте стратегического планирования (до 2020 года).

В дальнейшем планируется проведение более детальных исследований, касающихся оценки влияния стационарных и мобильных источников загрязнения с использованием данных по выбросам в атмосферу по каждому экономическому субъекту.

Список литературы

- Akimoto K., Sano F., Oda J., Homma T., Rout U. K., Tomoda T.* Global emission reductions through a sectoral intensity target scheme // *Climate Policy*. — 2008. — Vol. 8, Issue 1. — P. 46–59.
- Akopov A. S., Hevencev M. A.* A Multi-agent genetic algorithm for multi-objective optimization // *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. — Manchester, 2013. — P. 1391–1395.
- Chi K. C., Nuttall W. J., Reiner D. M.* Dynamics of the UK natural gas industry: system dynamics modelling and long-term energy policy analysis // *Technological Forecasting & Social Change*. — Elsevier, Vol. 76, Issue 3, 2009. — P. 339–357.
- Feng Y. Y., Chen S. Q., Zhang L. X.* System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing, China // *Ecological Modelling*. — 2003. — Elsevier, Vol. 252. — P. 44–52.
- Granger C. W. J.* Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods // *Econometrica*. — 1969. — Vol. 37, Issue 3. — P. 424–438.
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J.* *The Limits to Growth: The 30-Year Update*. — Chelsea Green Publishing, 2004. — 342 p.
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens W. W.* *The Limits to Growth*. — N.-Y.: Universe Books., 1972. — 205 p.
- Zitzler E., Thiele L.* Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. — 1999. — Vol. 3, Issue 4. — P. 257–271.