

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С МЕХАНИЗМОМ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ<sup>1</sup>

*А.С. Акопов, Л.А. Бекларян,  
А.Л. Бекларян, А.К. Сагателян*

В статье рассматриваются актуальные вопросы моделирования эколого-экономической системы на примере Республики Армения (РА). Основываясь на методах агентного моделирования и системной динамики, создана имитационная модель эколого-экономической системы, позволившая построить «экологическую карту» РА. Важной целью предлагаемого подхода является поиск сценариев рациональной модернизации предприятий, являющихся основными источниками выбросов вредных веществ, с одновременным определением эффективной стратегии государственного регулирования. Сформулирована и решена бикритериальная задача оптимизации характеристик эколого-экономической системы на примере РА.

*Ключевые слова:* эколого-экономическая система, имитационное моделирование, системная динамика, агентное моделирование, многокритериальная оптимизация.

© Акопов А.С., Бекларян Л.А., Бекларян А.Л.,  
Сагателян А.К., 2016 г.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-51-05011).

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается новое направление в области устойчивого развития эколого-экономических систем, которое в зарубежной литературе называется ecological economics (Costanza et al., 1997).

Особенность данного направления – изучение долгосрочной динамики социально-экономической системы с учетом взаимодействия ключевых экономических агентов (добывающих и перерабатывающих предприятий, являющихся основными источниками выбросов вредных веществ, потребителей (внутренних и внешних), государства выполняющего регулирующие функции, в частности, по отношению к предприятиям – источникам выбросов, транспортным средствам, организаций, осуществляющих поставку экологически чистых продуктов и услуг, трудовых ресурсов, населения) и окружающей среды, в том числе полезных ископаемых, водных ресурсов, источников энергии, земельных, лесных и других ресурсов.

Сложность определения наилучших сценариев долгосрочного развития эколого-экономической системы обусловлена не только масштабом и числом ее подсистем и их элементов, но прежде всего наличием внутренних нелинейных множественных обратных связей, которые имеют как балансирующий, так и усиливающий характер (например, недостаточно регулируемая со стороны государства динамика выбросов в текущий момент времени стимулирует предприятия к росту объемов вредного производства в последующие моменты времени), что приводит к возникновению труднопрогнозируемого мультипликативного эффекта. Например, ограничение добычи полезных ископаемых, очевидно, снижает уровень выбросов вредных веществ в атмосферу, однако также приводит к снижению совокупного выпуска и налоговых поступлений в бюджет РА. Но улучшение общей экологической ситуации в регионе способствует развитию

экологически чистых отраслей экономики, в частности туризма, сектора высоких технологий, современного сельского хозяйства и др., которые могут компенсировать «вклад» неэкологичных (преимущественно добывающих) отраслей экономики. В качестве примера можно указать на обоснованный законодательный запрет<sup>2</sup> на добычу и переработку руды рядом с озером Севан, а также строительство и эксплуатацию любых иных загрязняющих производств. При этом роль водных ресурсов данного озера выходит далеко за рамки туристического сектора экономики РА. Эта роль в том числе состоит в обеспечении пресной водой, возможности функционирования Севанского каскада ГЭС, существования множества подземных вод, внутренних бассейнов, рыбного хозяйства и др. Следует отметить наличие системы жестких финансовых, инвестиционных, транспортных и социальных ограничений, характерных для экономики РА, которые приводят к дефициту традиционных движущих сил экономического роста и существенно ограничивают возможности государства по экологическому регулированию предприятий (в том числе посредством модернизации, частичной или полной консервации и др.).

Поэтому для поиска сценариев долгосрочного развития подобной сложной эколого-экономической системы необходимо использовать методы *системной динамики* (Forrester, 1961) и *агентного моделирования* (Granovetter, 1978), позволяющие комплексно учитывать мультипликативное влияние внутренних обратных связей, потоковую динамику природных ресурсов, взаимозависимости между ключевыми экономическими агентами (в частности, производителями и государством) и возможности эффективного государственного регулирования.

Идея использования методов системной динамики и агентного моделирования для исследования эколого-экономических си-

стем не является новой. С помощью методов системной динамики исследованы возможности восстановления эколого-экономической системы Южной Африки (Crookes et al., 2013), потенциала развития экологического сельского хозяйства Китая (Shi, Gill, 2005) и динамики запасов водных ресурсов Китая (Zhang et al., 2014), а также охотничьих природных ресурсов Южной Америки (Iwamura et al., 2014) и др.

В российской экономической литературе также наблюдается определенный интерес к изучению эколого-экономических систем (Акимова и др., 2005; Рюмина, 2008; Гольц, Карцев 2008; Гурман др., 2015).

В данной статье представлена концепция агентоориентированной модели эколого-экономической системы РА. Построена укрупненная экологическая карта Армении, на которой показана динамика перехода агентов-производителей от исходного состояния основных источников выбросов вредных веществ к целевому конечному состоянию – экологически чистых производств.

Цель подобной работы состоит в системном анализе важнейших характеристик эколого-экономической системы на примере РА с учетом имеющихся взаимосвязей между основными экономическими агентами и окружающей средой и в формировании стратегии государственного регулирования (стимулирования) агентов-производителей с целью обеспечения мотивации их перехода к экологически чистому производству.

## МОДЕЛЬ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

Используя методы системной динамики, ранее была разработана укрупненная имитационная модель эколого-экономической системы РА (Акопов и др., 2014). В рамках данной модели были определены предприятия РА, являющиеся основными источниками

<sup>2</sup> Закон РА «Об озере Севан» принят 15 мая 2001 г.

загрязнения атмосферы, которые необходимо модернизировать для минимизации уровня выбросов вредных веществ. Такой подход позволил оценить прогнозную динамику сокращения выбросов в атмосферу таких основных вредных веществ, как оксиды углерода ( $\text{CO}_x$ ), углеводороды (CH), диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), летучие органические вещества (NMVOC), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ). Вместе с тем в реальной экономической системе РА такую централизованную (управляемую) модернизацию предприятий крайне трудно воплотить из-за дефицита инвестиционного капитала и сложности государственного администрирования. Поэтому необходим механизм, обеспечивающий предприятиям стимулы самостоятельно проводить модернизацию и переходить к экологически чистому производству. Подобным механизмом является *государственное регулирование деятельности производителей* посредством штрафов и дотаций, направленных на отказ от использования технологий, загрязняющих окружающую среду, в пользу экологически чистых технологий. На рис. 1 представлена карта состояний: алгоритм поведения агентов-производителей, учитывающий влияние

государственного регулирования в форме штрафов (за превышение предельных уровней выбросов вредных веществ), ликвидации юридического лица (за систематическое нарушение экологического законодательства) и субсидий (при существенном снижении уровня выбросов).

На рис. 1 видно, что в рассматриваемой модели агенты-производители могут иметь четыре возможных конечных состояния:

- *неэкологичное производство* – производство, при котором предприятие остается одним из основных источников выбросов вредных веществ;
- *закрытие компании* – полная ликвидация предприятия, в результате которого устраняется источник выбросов вредных веществ;
- *частичная модернизация* – предприятие существенно (по сравнению с предыдущим периодом) снижает уровень выбросов вредных веществ;
- *экологически чистое производство* – малоотходное производство, ориентированное на предотвращение образования отходов, а в случае их образования – на переработку отходов в местах их образования.

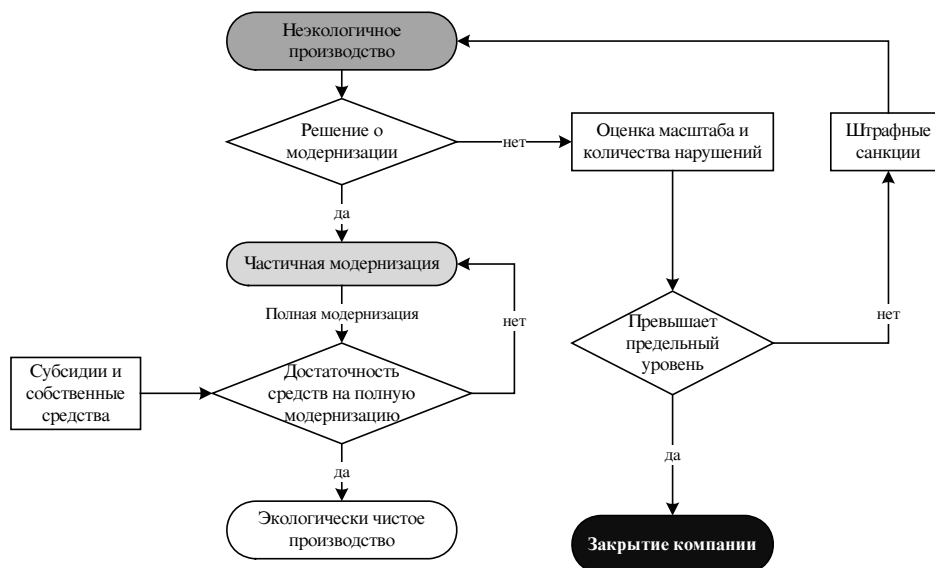


Рис. 1. Алгоритм поведения агентов-производителей

Взаимозависимости между ключевыми характеристиками рассматриваемой эколого-экономической системы как среды существования агентов могут быть описаны в терминах системной динамики и представлены в виде укрупненной когнитивной модели (рис. 2).

На рис. 2 с использованием нотации метода системной динамики показаны важнейшие прямые и обратные связи между ключевыми характеристиками рассматриваемой эколого-экономической системы. Буквами R1, R2 и R3 обозначены усиливающие обратные связи, а буквами B1 и B2 – балансирующие обратные связи. Так, например, рост валового внутреннего продукта (ВВП) приводит при одновременном снижении совокупного объема выбросов вредных веществ в атмосферу к росту «эколого-экономической привлекательности региона» (ecological attraction), и, как следствие, к увеличению потока иммигрантов и туристов, что в следующем периоде времени увеличивает ВВП (обратная связь R1). Однако рост объемов добычи и переработки (сырья), а также расширение производства экологически чистых продуктов также увеличивают ВВП (обратные связи R1,

R2). При этом рост доходов от неэкологичных добывающих и перерабатывающих производств балансируется за счет ухудшения экологической ситуации. Одновременно происходит увеличение уровня заболеваемости населения и сокращение численности занятых в экономике (обратная связь B1), а также снижение уровня «эколого-экономической привлекательности региона» с последующим ростом эмиграции из региона и падением доходов от туризма (обратная связь B2).

Таким образом, с использованием методов системной динамики моделируется среда функционирования ключевых экономических агентов – предприятий – источников выбросов вредных веществ в атмосферу и государства, осуществляющего регулирующие функции.

Приведем формальное описание основной части разработанной агентоориентированной модели эколого-экономической системы РА, относящейся к поведению агентов-предприятий с механизмом государственного регулирования. Отметим, что модель динамики внешней среды с учетом характеристик всех населяющих ее агентов требует

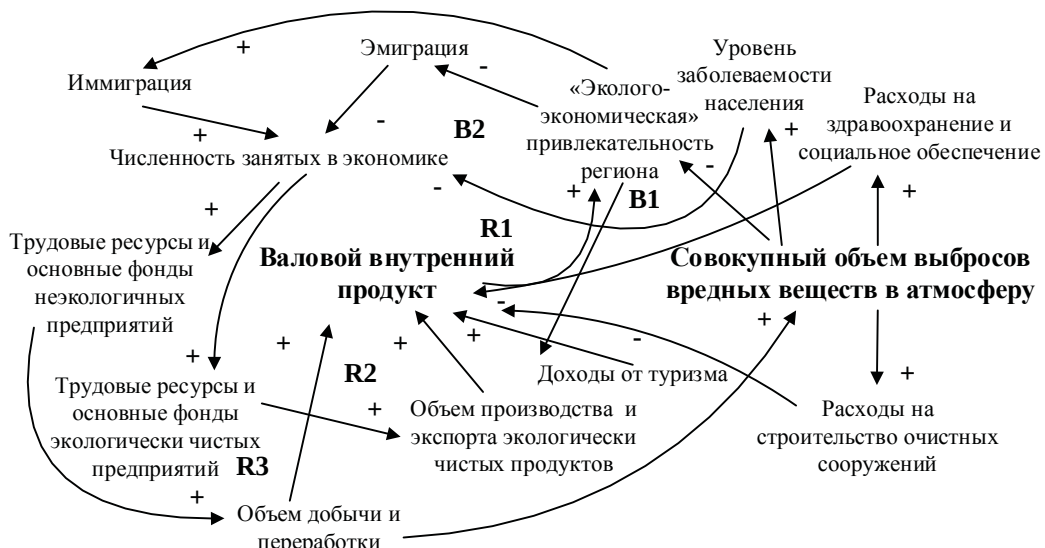


Рис. 2. Укрупненная когнитивная модель эколого-экономической системы РА

самостоятельного детального изучения и выходит за рамки данной статьи.

Введем следующие обозначения:

$t \in \{t_0, t_0 + 1, \dots, t_0 + T\}$  – время по годам ( $t_0$  – начальный момент времени,  $T$  – горизонт стратегического планирования);  $J(t)$  – множество индексов агентов-предприятий, являющихся источниками выбросов вредных веществ;  $j \in J(t)$  – индекс агента-предприятия в момент времени  $t$ ;  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$  – виды вредных веществ:  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NMVOС$ ,  $CH$  и др.;

$st_j(t) \in \{1, 2, 3, 4\}$  – возможные состояния агента-предприятия  $j$ :  $st_j(t) = 1$  – исходное состояние неэкологического производства;  $st_j(t) = 2$  – частичная модернизация;  $st_j(t) = 3$  – экологически чистое (малоотходное) производство;  $st_j(t) = 4$  – ликвидация предприятия вследствие нарушения экологического законодательства;

$$\gamma_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } st_j(t) = 1, \\ 0,5, & \text{если } st_j(t) = 2, \\ 0,01, & \text{если } st_j(t) = 3, \\ 0, & \text{если } st_j(t) = 4 \end{cases}$$

коэффициент, определяющий объем выбросов вредных веществ в атмосферу в зависимости от состояния агента-предприятия  $j$ ;

$E_j(t)$  – совокупный объем выбросов вредных веществ в атмосферу агентами-предприятиями  $j$ ;

$$E_j(t) = \sum_{i=1}^I \gamma_j(t) e_{ij}, \quad (1)$$

где  $e_{ij}$  – средний объем выбросов вредных веществ  $i$  в атмосферу агентами-предприятиями  $j$ ;

$C_j(t)$  – затраты на модернизацию или ликвидацию агента-предприятия  $j$ ;

$$C_j(t) = \begin{cases} p_j(t)(1 - \gamma_j(t)), & \text{если } st_j(t) \neq 4, \\ \bar{p}_j(t), & \text{если } st_j(t) = 4, \end{cases} \quad (2)$$

где  $p_j(t)$  – стоимость модернизации агента-предприятия  $j$ ;  $\bar{p}_j(t)$  – стоимость ликвидации агента-предприятия  $j$ ;

$V_j(t)$  – совокупный объем выпуска агента-предприятия  $j$ , вычисляется с помощью хорошо известной функции Кобба–Дугласа вида

$$V_j(t) = \begin{cases} A_{0;j}(t)(L_t(t))^{\alpha_j(t)}(K_t(t)\gamma_j(t))^{\beta_j(t)}, & \text{если } st_j(t) = 1 \text{ или } st_j(t) = 2, \\ A_{0;j}(t)(L_t(t))^{\alpha_j(t)}(\underline{K}_t(t))^{\beta_j(t)}, & \text{если } st_j(t) = 3, \\ 0, & \text{если } st_j(t) = 4, \end{cases} \quad (3)$$

где  $A_{0;j}(t)$  – фактор научно-технического прогресса для агента-предприятия  $j$ ;  $L_t(t)$  – численность трудовых ресурсов агента-предприятия  $j$ ;  $K_t(t)$  – основные фонды агента-предприятия  $j$ ;  $\underline{K}_t(t)$  – минимально необходимые основные фонды агента-предприятия  $j$  при экологически чистом производстве;  $\alpha_j(t)$ ,  $\beta_j(t)$  – параметры производственной функции Кобба–Дугласа, для которых  $\alpha_j(t) + \beta_j(t) = 1$  для всех  $j \in \{1, 2, \dots, J(t)\}$ ;

$D_j(t)$  – дотации на модернизацию агента-предприятия  $j$  со стороны государства, в рамках предлагаемой модели выплачиваются только предприятиям, уже частично модернизированным и при условии дефицита собственных средств, необходимых для полной модернизации и переходу к экологически чистому производству:

$$D_j(t) = \begin{cases} \lambda_j(t)C_j(t), & \text{если } st_j(t-1) = 2 \\ & \text{и } C_j(t) - P_j(t-1) > 0, \\ 0, & \text{если } st_j(t-1) \neq 2 \\ & \text{или } C_j(t) - P_j(t-1) \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\lambda_j(t)$  – управляющий параметр системы государственного регулирования, определяющий долю затрат на модернизацию субсидируемых со стороны государства ( $0 < \lambda_j(t) \leq 1$ );

$\bar{D}(t)$  – предельно допустимый объем дотаций, который может быть направлен на

модернизацию всех агентов-предприятий со стороны государства;

$F_j(t)$  – штрафы для агента-предприятия  $j$  со стороны государства, обусловленные существенным нарушением экологического законодательства:

$$F_j(t) = \begin{cases} \eta_j(t)P_j(t-1), & \text{если } E_j(t) \geq \bar{E}_j(t) \\ \text{и } st_j(t-1) \neq 3, \\ 0, & \text{если } E_j(t) < \bar{E}_j(t) \\ \text{или } st_j(t-1) = 3, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\eta_j(t)$  – управляющий параметр системы государственного регулирования, определяющий долю прибыли, полученной агентом-предприятием в предыдущем периоде, направляемую на выплату штрафов ( $0 < \eta_j(t) \leq 1$ );  $\bar{E}_j(t)$  – предельно допустимый уровень вредных веществ в атмосферу для данного предприятия;

$P_j(t)$  – прибыль агента-предприятия  $j$ :

$$P_j(t) = \tilde{p}_j(t)V_j(t) - C_j(t) + D_j(t) - F_j(t) - \text{const}_j(t), \quad (6)$$

где  $\tilde{p}_j(t)$  – средние цены на продукцию агента-предприятия  $j$ ;  $F_j(t)$  – штрафы для агента-предприятия  $j$  со стороны государства;  $\text{const}_j(t)$  – совокупные постоянные затраты агента-предприятия  $j$  (в том числе затраты на оплату труда, налоги, амортизация основных фондов и т.д.).

Отметим, что в рамках данной модели рассматриваются два типа агентов. К первому типу относятся агенты-предприятия, являющиеся основными источниками выбросов вредных веществ в атмосферу, максимизирующие в каждый момент времени  $t$  собственную прибыль. Ко второму типу относится государство, стремящееся к минимизации совокупного уровня выбросов вредных веществ в атмосферу за счет выбора оптимальной стратегии государственного регулирования (дифференцированной по отношению к агентам-предприятиям). В результате можно

сформулировать бикритериальную оптимизационную задачу для рассматриваемой эколого-экономической системы.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется максимизировать прибыль каждого агента-предприятия  $j$  при минимально возможных совокупных выбросах вредных веществ в атмосферу:

$$\begin{cases} \max_{st_j(t)} \sum_{t=t_0}^{t_0+T} P_j(t), \\ \min_{\lambda_j(t), \eta_j(t)} \sum_{t=t_0}^{t_0+T} E_j(t) \end{cases} \quad (7)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^{J(t)} D_j(t) \leq \bar{D}(t), \quad (8)$$

$$st_j(t) \in \{1, 2, 3, 4\}, \quad 0 < \eta_j(t) \leq 1,$$

$$j \in \{1, 2, \dots, J(t)\}, \quad (9)$$

и других ограничениях, имеющих понятный экономический смысл.

В результате решения задачи (7)–(9), формируется подмножество оптимальных по Парето решений. Выбор конечного сценария модернизации предприятий с учетом стремления к максимизации их прибыли с одновременной минимизацией совокупных выбросов осуществляется при дополнительных предпочтениях, формируемых на основе анализа возможных последствий реализации соответствующих стратегий модернизации. При этом оцениваются структура выбросов веществ в атмосферу (по каждому крупному предприятию) и их «вклад» в динамику заболеваемости населения. Отметим, что различные химические элементы дифференцированно влияют на состояние здоровья населения. Например, избыточная концентрация оксида углерода (СО) приводит к интоксикации организма (при

определенных концентрациях – к летальному исходу), а систематические выбросы диоксида серы – к росту легочных заболеваний, выбросы оксида азота – к росту респираторных заболеваний. Каждый тип заболеваний имеет различные социально-экономические последствия, которые необходимо учитывать при принятии решений, в том числе связанных с закрытием неэкологичных предприятий.

Следует отметить, что применительно к региональным эколого-экономическим системам также целесообразна постановка однокритериальной оптимизационной задачи – в виде максимизации экологически регулируемой прибыли агентов-предприятий, т.е. прибыли за вычетом будущих платежей за загрязнение среды, возмещающих соответствующий ущерб государству. При этом эффективным механизмом стимулирования агентов-предприятий к модернизации может стать реструктуризация системы налогообложения, отражающая рост ставок платежей за загрязнение при компенсирующем снижении других налогов (платежей).

Однако применительно к РА данный подход требует существенной трансформации системы организации сбора и администрирования налогов. Кроме того, оценка потенциального ущерба от загрязнения окружающей среды со стороны предприятий РА и, как следствие, расчет прогнозной динамики платежей за загрязнение являются трудной задачей, требующей ретроспективных данных, детально описывающих структуру и объемы подобных платежей, в том числе за загрязнение воздуха, воды, почвы и т.д., а также фактические значения объемов выбросов вредных веществ с соответствующей оценкой нанесенного ущерба. К сожалению, подобная статистика на уровне отдельных предприятий РА имеет конфиденциальный характер и является далеко не полной.

Отметим, что финансовые ресурсы большинства агентов-предприятий РА серьезно ограничены, что означает невозможность полной компенсации экологического ущерба по фактическим ставкам. При этом собствен-

ных средств у предприятий, как правило, недостаточно для внедрения современных очистительных систем и соответствующих технологий. Поэтому предлагается подход, основанный на использовании системы штрафов и дотаций в качестве механизма стимулирования агентов-предприятий проводить модернизации и поэтапно переходить к экологически чистому производству.

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

На основе предложенного алгоритма поведения агентов-предприятий (см. рис. 1) с учетом динамики внешней среды (см. рис. 2) и бикритериальной оптимизационной задачи (7)–(9) была разработана имитационная модель эколого-экономической системы, реализованная в системе AnyLogic (рис. 3).

Важными преимуществами системы AnyLogic являются:

- возможность комбинированного использования различных методов имитационного моделирования, в частности системной динамики и агентного моделирования;
  - интегрируемость имитационной модели с базами данных;
  - интегрируемость имитационной модели с геоинформационными системами (ГИС), в том числе возможность динамической визуализации состояния агентов на географической карте (см. рис. 3);
  - возможность агрегировать имитационную модель с разработанным генетическим оптимизационным алгоритмом, в частности, обеспечивающим формирование подмножества оптимальных по Парето решений для рассматриваемой задачи эколого-экономической системы. Данный алгоритм описан в работах (Акопов, 2014; Акопов, Невенцев, 2013).
- Отметим, что разработанная имитационная модель интегрирована с предмет-

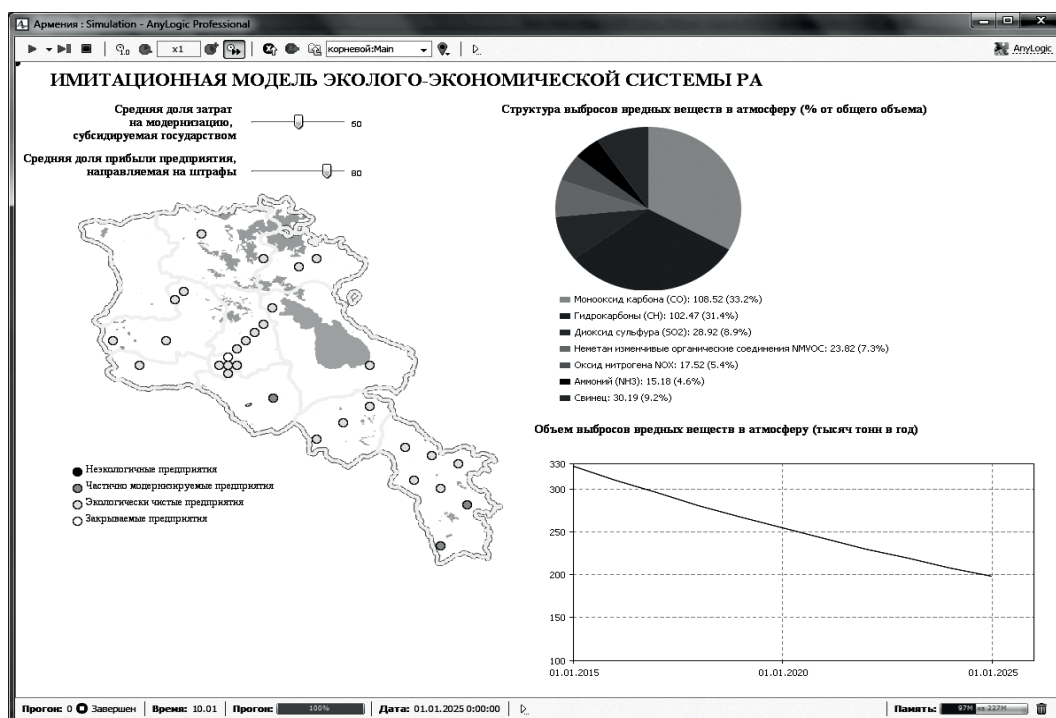


Рис. 3. Имитационная модель эколого-экономической системы РА в системе AnyLogic

но-ориентированной базой данных, которая содержит актуальную информацию о стационарных источниках выбросов предприятий РА и создана с использованием статистических данных, предоставленных Центром эколого-ноосферных исследований Национальной академии наук РА<sup>3</sup>.

Результаты имитационного моделирования выгружаются в базу данных и наносятся на географические карты (рис. 4–6).

На картах представлена прогнозная динамика возможных состояний (до 2025 г.) модернизируемых агентов-предприятий, являющихся основными источниками выбросов вредных веществ в РА. Черным цветом выделены предприятия с незаконопослушным производством, темно-серым – частично-модернизированные предприятия, светло-серым – предприятия, ставшие экологически

чистыми в результате полной модернизации, белым – предприятия, которые желательно закрыть. Отметим, что на картах показаны не юридические, а фактические адреса предприятий (в том числе множественные), непосредственно относящихся к источникам соответствующих выбросов (например, для добывающих предприятий это координаты горнорудных месторождений).

Отметим, что результаты имитационного моделирования, полученные с помощью разработанной децентрализованной агентоориентированной модели эколого-экономической системы, оказываются схожими (в плане оптимального плана модернизации предприятий) с результатами ранее предложенной укрупненной (централизованной) модели эколого-экономической системы, реализованной исключительно с использованием методов системной динамики (Акопов и др., 2014). Конечный предлагаемый

<sup>3</sup> См.: <http://ecocentre.am/>.

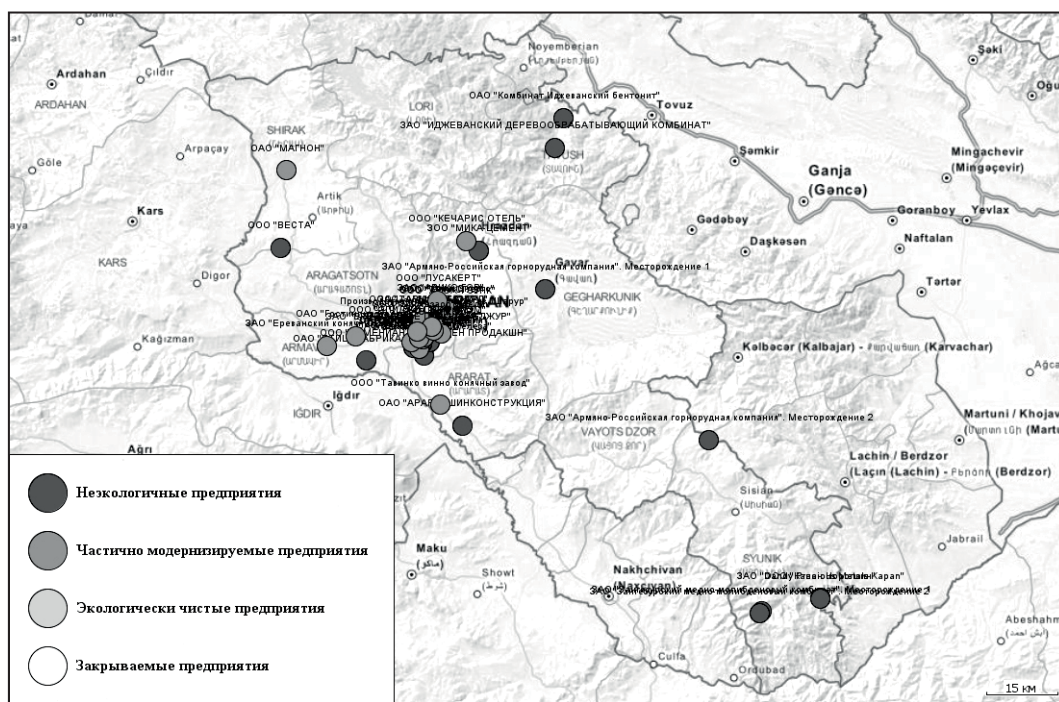


Рис. 4. Исходное состояние агентов-предприятий, являющихся основными источниками выбросов вредных веществ (карта Республики Армения, 2015 г.)

сценарий модернизации выбран среди множества всех полученных Парето-оптимальных решений как наиболее предпочтительный для социально-экономической системы. При этом найдены оптимальные значения параметров государственного регулирования:  $\lambda_j(t)$  (доля затрат на модернизацию, субсидируемая государством) и  $\eta_j(t)$  (доля прибыли предприятия, полученная за предыдущий год и направляемая на выплату штрафов) для всех рассматриваемых агентов-предприятий  $j \in J(t)$ . Отметим, что средние оптимальные значения  $\hat{\lambda}_j(t) \approx 50\%$  (для отдельных предприятий достаточно 10%-го субсидирования) и  $\hat{\eta}_j(t) \approx 80\%$  (для отдельных предприятий штрафы должны доходить до 100% полученной ими прибыли).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя методы системной динамики и агентного моделирования, была разработана имитационная модель эколого-экономической системы РА, учитывающая особенности системы государственного экологического регулирования. Результаты имитационного моделирования позволяют сделать вывод о принципиальной возможности модернизации большинства предприятий РА, деятельность которых сопровождается существенными выбросам вредных веществ в атмосферу. При этом переход к модели экологической экономики возможен за счет собственных средств предприятий, а также дотаций со стороны государства. К сожалению, некоторые предприятия, в частности осуществляющие добычу и переработку медно-молибденового концентрата, не могут быть приведены к экологиче-

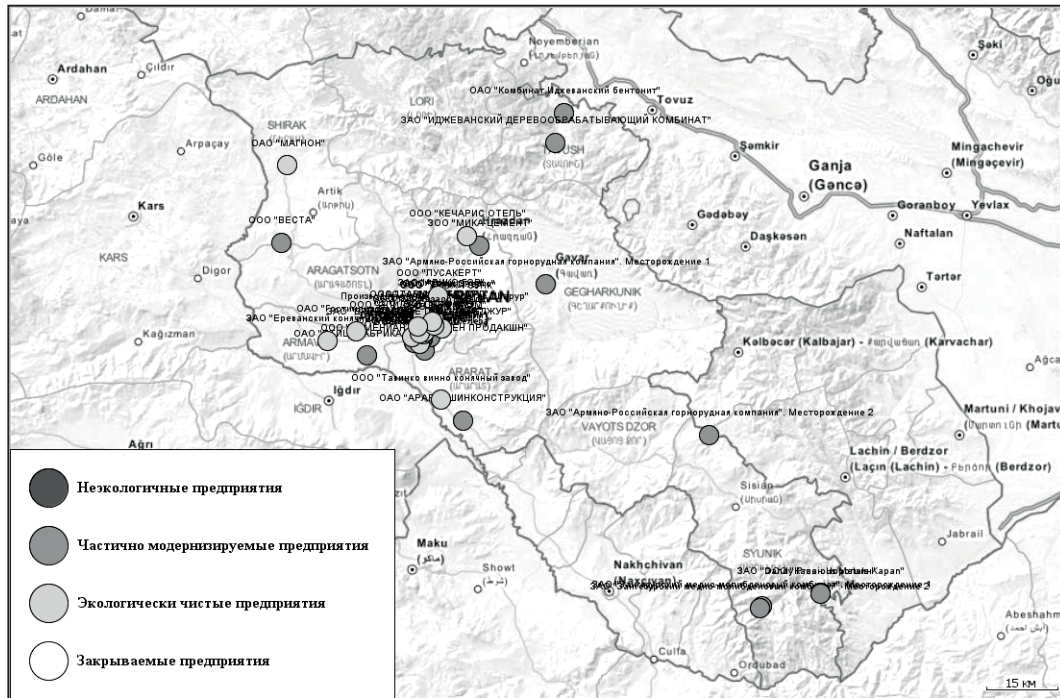


Рис. 5. Промежуточное состояние агентов-предприятий, рассчитанное с помощью разработанной имитационной модели на 2020 г.

ски чистому производству из-за существующих технологических ограничений, и поэтому их целесообразно постепенно консервировать с одновременным созданием новых экологически чистых производств.

## Литература

- Акимова Т., Хаскин В., Сидоренко С., Зыков В. Макроэкология и основы экоразвития: Учеб. пособие. М.: Изд-во РУДН, 2005.
- Акопов А.С., Бекларян Л.А., Бекларян А.Л., Сагателян А.К. Укрупненная модель эколого-экономической системы на примере Республики Армения // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 4. С. 621–631.
- Гурман В.И., Дамешек Л.Ю., Константинов Г.Н., Насатуева С.Н., Расина И.В., Чemezova Т.В. Нормирование антропогенных воздействий на природную среду на основе эколого-экономических моделей // Управление большими системами. Специальный выпуск. 2015. № 55. С. 160–184.
- Гольц Г.А., Карцев В.Ю. Изучение многомерной динамической взаимозависимости экономики и экологии // Экономическая наука современной России. 2008. № 2 (38). С. 127–133.
- Рюмина Е.В. Экономический интерес в сохранении окружающей природной среды // Экономическая наука современной России. 2008. № 2 (38). С. 88–95.
- Akopov A.S. Parallel genetic algorithm with fading selection // International Journal of Computer Applications in Technology. 2014. Vol. 49. № 3/4. P. 325–331.

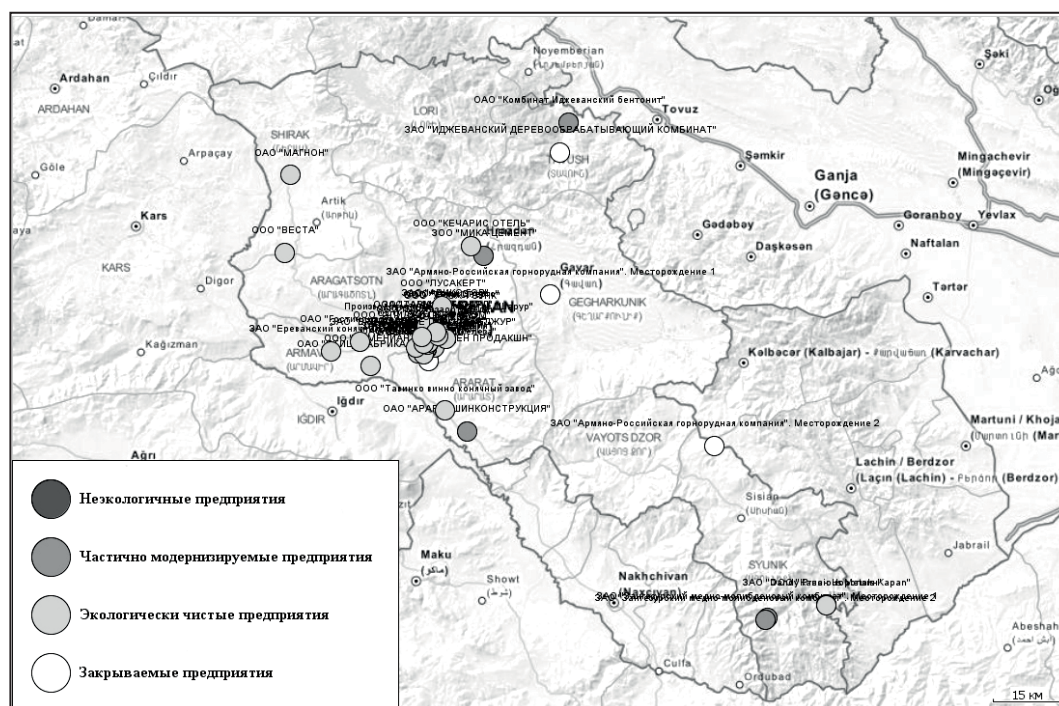


Рис. 6. Оптимальное конечное состояние агентов-предприятий на 2025 г.

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, 2013. Manchester: IEEE, 2013. P. 1391–1395.

Costanza R., Cumberland J., Daly H., Goodland R., Norgaard R. An introduction to ecological economics. St. Lucie Press and ISEE, 1997.

Forrester J.W. Industrial dynamics. Boston: MIT Press, 1961.

Crookes D.J., Blignaut J.N., de Wit M.P., Esler K.J. System dynamic modelling to assess economic viability and risk trade-offs for ecological restoration in South Africa // Journal of Environmental Management. 2013. Vol. 120. № 15. May. P. 138–147.

Granovetter M. Threshold models of collective behavior // American Sociological Review. 1978. Vol. 83. P. 1420–1442.

Shi T., Gill R. Developing effective policies for the sustainable development of ecological agriculture in

China: The case study of Jinshan County with a systems dynamics model // Ecological Economics. 2005. Vol. 53. Iss. 2. 15 April. P. 223–246.

Zhang Z., Lu W.X., Zhao Y., Song W.B. Development tendency analysis, and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Shipping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process // Ecological Modelling. 2014. Vol. 275. 10 March. P. 9–21.

Iwamura T., Lambin E., Silvius Kirsten M., Luzard J.B., Fragoso José M.V. Agent-based modeling of hunting and subsistence agriculture on indigenous lands: Understanding interactions between social and ecological systems // Environmental Modelling & Software. 2014. Vol. 58. P. 109–127.

Рукопись поступила в редакцию 06.07.2015 г.