

В.Л. Макаров

Центральный экономико-математический институт РАН, Москва

А.Р. Бахтизин

Центральный экономико-математический институт РАН, Москва

Е.Д. Сушко

Центральный экономико-математический институт РАН, Москва

Агент-ориентированная модель как инструмент регулирования экологии региона¹

Аннотация. Для создания комплексной системы экологического регулирования, побуждающей экономических акторов снижать выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду, необходимо использовать инструменты предварительной оценки эффектов от реализации планируемых мер. Одним из таких инструментов может стать агент-ориентированная социо-эколого-экономическая модель региона. В разработанной авторами модели присутствуют популяции агентов-людей и агентов-предприятий. Каждый агент-человек участвует в демографических процессах и вносит свой вклад в производственную деятельность агентов-предприятий. А каждый агент-предприятие, кроме продукции, производит также выбросы в атмосферу и в водные объекты. Все виды загрязнений суммарно воздействуют на экологию региона, что влияет на показатели здоровья и смертности агентов-людей. Агенты-предприятия могут сокращать объемы своих выбросов с помощью доступных для них действий в ответ на экологические требования, которые устанавливаются в рамках различных механизмов регулирования выбросов. Пользователь модели в ходе компьютерных экспериментов может изменять параметры действующих механизмов и создавать новые.

Ключевые слова: *агент-ориентированное моделирование, контроль загрязнения, экологическая экономика, стимулирующее регулирование, рыночный инструмент, бабл-принцип.*

Классификация JEL: C63, Q52, Q53, Q58.

DOI: 10.31737/2221-2264-2020-45-1-6

1. Введение

Хозяйственная деятельность человека оказывает сильнейшее воздействие на природную среду, и зачастую это воздействие — неблагоприятное. В частности, оно выражается в загрязнении атмосферного воздуха и водных ресурсов, возросшем в результате развития промышленного производства. В настоящее время уровень антропогенного воздействия на природные комплексы (накопленная экологическая нагрузка на окружающую человека среду) во многих регионах мира уже вызывает значительные изменения различных компонентов экосистемы и грозит нарушением выполняемых ими природных функций. Эти нарушения создают серьезные социальные проблемы: экологическое неблагополучие негативно влияет на здоровье населения, вызывает рост смертности от причин, связанных с уровнем загрязнений, и т.д. Критическое состояние экологии вызывает недовольство

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-02-00416).

людей и может вызвать их миграцию в более благополучные регионы. Осознание этих проблем побуждает правительства многих стран искать способы управления экологической ситуацией на своей территории для поиска компромисса между ростом производства и обеспечением приемлемого уровня загрязнения окружающей среды. Примером важного шага к решению проблемы загрязнения окружающей среды в масштабе всей планеты стало принятие в 1997 г. Киотского протокола к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата – международного соглашения, обязывающего развитые страны и страны с переходной экономикой сократить или стабилизировать выбросы парниковых газов (Kyoto protocol..., 1997). Кроме того, для улучшения экологической ситуации и/или удержания ее в приемлемых границах в большинстве стран применяются различные экономические и административные меры регулирования. Эти меры направлены главным образом на стимулирование экономических акторов разного уровня (от отдельных людей, проживающих на территории страны, до предприятий) сокращать выбросы вредных веществ. Этой теме посвящено множество публикаций. Так, в работах (Бурков и др., 2008; Wolf et al., 2016) представлен анализ различных механизмов управления эколого-экономическими системами, включая оптимизационные, теоретико-игровые и имитационные модели. В (Бурков и др., 2008) детально рассмотрен широкий спектр мер, начиная от внедрения систем мониторинга, систем компенсации затрат на снижение уровня риска и применения штрафов, и до систем экономической мотивации предприятий снижать выбросы вредных веществ в природную среду.

Примером одного из наиболее действенных механизмов регулирования выбросов в атмосферу от стационарных источников (промышленных выбросов) является система торговли квотами на выбросы, основанная на бабл-принципе (Burtraw, Szambelan, 2009). Метод является гибким инструментом стимулирующего регулирования, побуждающим предприятия снижать нагрузки на окружающую среду, так как он задает предприятиям, расположенным на определенной территории, ограничения объемов выбросов вредных веществ, но одновременно предоставляет им определенную свободу выбора способов достижения заданных нормативов выбросов. Так, предприятия, находящиеся на территории региона (“bubble”), которым удалось снизить суммарный выброс загрязняющего вещества ниже установленного им уровня (квоты на выбросы), могут продавать излишки сокращения выбросов тем предприятиям данного региона, которые свою квоту превысили. Что позволяет предприятиям выбирать наиболее экономически целесообразную стратегию достижения заданных экологических нормативов – платить штрафы, покупать / продавать квоты на выбросы, устанавливать системы очистки или модернизировать производство. При этом суммарная экологическая нагрузка внутри региона сохраняется в заданных пределах. Важно отметить, что различные варианты меха-

низма торговли квотами на выбросы практически реализованы правительствами разных стран; они продемонстрировали высокую эффективность с точки зрения общества в целом, так как позволили добиться поставленной природоохранной задачи с наименьшими затратами. Например, в (U.S. EPA..., 2017) показана динамика снижения выбросов SO₂, достигнутая в США за 25 лет регулирования с помощью торговли квотами на выбросы.

Указанные достоинства механизма бабл-принципа спровоцировали попытки его адаптации для применения, например при регулировании сбросов загрязняющих веществ в составе сточных вод в водные объекты (см., например, (Трейман, Юдин, 2014)). При этом рассмотренный механизм включает в явном и неявном виде множество параметров, от которых зависит успешность и эффективность его применения. Это – и структура накопленной экологической нагрузки (доля различных видов вредных веществ и источников их выбросов в общем уровне загрязнения), и уровень штрафных санкций за загрязнение атмосферного воздуха и водных ресурсов, и параметры институциональной среды, в которой действуют экономические акторы, и даже особенности ландшафта различных территорий. Таким образом, каждая территория как социо-эколого-экономическая система характеризуется уникальным набором параметров наиболее подходящего именно для нее механизма регулирования экологической сферы. Очевидно, что для настройки этих параметров, подбора их разумного сочетания было бы полезно располагать инструментом предварительной оценки как последствий изменения внешней среды, так и эффектов от реализации различных мер регулирования.

Настоящее исследование посвящено разработке подобного инструмента для последующей его реализации в виде программного обеспечения. Использование этого инструмента должно позволить принимающим столь ответственные решения лицам в ходе компьютерных экспериментов подбирать такие параметры механизмов регулирования экологической сферы, которые бы обеспечивали сбалансированный экономический рост при приемлемом состоянии экологии региона.

2. Применение агент-ориентированного подхода в моделировании эколого-экономических систем (обзор публикаций)

Одним из наиболее продуктивных подходов к созданию инструментов прогнозирования динамики сложных систем является использование имитационного моделирования, особенно такого его вида, как агент-ориентированное моделирование (Handbook of Research..., 2009). Суть агент-ориентированного моделирования больших социально-экономических систем, включающих множество самостоятельных экономических акторов, состоит в воссоздании в искусственной

(компьютерной) среде основных особенностей моделируемой реальной системы и дальнейшей имитации действий именно отдельных, самостоятельных акторов. При этом акторы (которые представлены в агент-ориентированной модели агентами) действуют самостоятельно, а изменение состояния системы в целом получается как интегральный результат действий и взаимодействий этих агентов.

Самостоятельность агентов означает, что они обладают некоторыми ресурсами (возможностями), миссией и соответствующими критериями ее выполнения, а также способностью принимать решения по выбору того или иного действия из доступных вариантов. Благодаря современному развитию вычислительных средств в агент-ориентированной модели (АОМ) можно создавать популяции агентов сколь угодно большой численности, наделяя при этом каждого агента индивидуальными характеристиками, значимыми с точки зрения его участия в экономической жизни. Важно, что значения этих характеристик у разных агентов могут различаться, т.е. каждый агент может обладать уникальной индивидуальностью, что и позволяет воспроизводить структуру реального сообщества и добиваться максимального правдоподобия при имитации происходящих в нем процессов.

Именно благодаря этим свойствам агент-ориентированный подход находит применение в моделировании самых разнообразных социально-экономических процессов. Существует ряд процессов, связанных с воздействием деятельности человека на природную среду, а также с воздействием экологического неблагополучия природной среды на здоровье человека и его социальное поведение. К важнейшим следует отнести процессы воспроизводства населения и его расселения; процессы производства (промышленного, сельскохозяйственного) и образования связанных с производством выбросов вредных веществ; процессы деградации природной среды и ее влияния на здоровье населения и т.д.

В современных публикациях можно найти описания множества АОМ, созданных для поиска решения различных эколого-экономических задач, в которых имитируются подобные процессы. Так, в научном обзоре (Ghazi et al., 2014) представлены 15 агент-ориентированных моделей, разработанных в период 2009–2013 гг., в которых имитируются социо-эколого-экономические условия исследуемых регионов с целью прогнозирования влияния различных антропогенных нагрузок на экологическое состояние территорий. В работе (Athanasiadis, 2005) проанализированы архитектура и конструкции более 20 программных сред и приложений, созданных с применением агент-ориентированного подхода для имитации экосистем, а также взаимосвязей компонент природной и социальных сред. Автор (Athanasiadis, 2005) разделяет рассмотренное программное обеспечение на три типа.

1. Программные приложения, применяемые для управления или распространения экологической информации, в которых

агенты программы выполняют пользовательские информационные запросы с целью выборки нужных данных из общей онтологии, а также первичной обработки этой информации.

2. Экологические системы поддержки принятия решения. В них, как правило, агент-ориентированный метод применялся не для построения общей конструкции, а в составе блока принятия решения. Программное обеспечение данного типа позволяет осуществлять оптимальный выбор стратегии развития территорий (регионов), экологически ориентированного промышленного производства или проектов управления экосистемами и технологическими процессами; прогнозировать последствия антропогенного воздействия на окружающую среду; исследовать влияние природно-климатических особенностей на региональные социально-экономические условия и т.п.
3. Симуляторы природной среды, в которых агенты используются как активные элементы имитационных процессов. Модели этого типа пригодны для изучения взаимодействия компонент социо-эколого-экономических систем и прогнозирования последствий различных экологических сценариев.

Разрабатываемую авторами агент-ориентированную модель, являющуюся развитием подхода, представленного в работе (Макаров и др., 2015), можно отнести ко второму типу указанной выше классификации – с элементами имитации процессов, происходящих в природной среде. Основные усилия авторов были направлены на достижение как можно более точного воспроизведения в искусственном обществе экономических, экологических и социальных процессов, а также предоставление пользователям АОМ широких возможностей для управления этими процессами. С этой точки зрения важнейшими признаками, в соответствии с которыми мы стремились разделить представленные в публикациях АОМ на группы, являются имитируемые в моделях процессы и функциональное назначение этих моделей. Ниже дан обзор основных групп таких АОМ и приведены краткие характеристики типичных представителей этих групп.

1. АОМ, имитирующие процессы загрязнения окружающей среды вследствие деятельности человека. Пожалуй, это – самый многочисленный класс АОМ экологической направленности, в который вошли модели как для различных сред (выбросы в атмосферу, стоки в водные ресурсы) и различных видов вредных веществ, выбрасываемых в ту или иную среду, так и модели для различных видов деятельности:

- 1.1) *выбросы в атмосферу от промышленных источников.* В работе (Chappin, Dijkema, 2009) моделируется поведение предприятий электроэнергетики, на долю которой в Европе приходится одна

треть выбросов CO_2 , и влияние на это поведение политики торговли выбросами;

- 1.2) *выбросы в атмосферу от автотранспорта*. В (Pulter et al., 2011) агенты имитируют движение в городе транспортных средств с учетом топологии дорог и расположения светофоров. Целью моделирования являлась оптимизация системы управления транспортными средствами для снижения объемов выбросов и уменьшения времени ожидания на перекрестках дорог;
- 1.3) *стоки загрязняющих веществ в водоемы*. В работе (Corchado et al., 2009) имитируется разрастание нефтяных пятен в океанических водах при разливе нефти. Встроенная в модель система прогнозирования влияния загрязнения вод на океанические и прибрежные экосистемы использует полученные со спутников актуальные данные, а также информационную базу, в которой хранятся разнородные ретроспективные данные о происходивших ранее инцидентах разлива нефти;
- 1.4) *загрязнения среды, связанные с сельскохозяйственным производством*. В (Yang et al., 2014) имитируется деятельность фермерских хозяйств и ее влияние на экологические условия Китая. Рассчитываются объемы выбросов нескольких вредных веществ: аммиака (загрязнение воздушной среды), суммарного уровня загрязнения водной среды (азот, фосфор и др.), объемы твердых сельскохозяйственных отходов. В работе (Shindler, 2009) имитируется динамика землепользования и изменение почвенно-растительного покрова в процессе вырубki лесов в северо-восточном регионе Ганы. В (Pereira et al., 2009) имитируется выбор агентами-фермерами участков для разведения устриц. Модель предназначена для исследования влияния этого вида деятельности на прибрежные экосистемы Санго Бей (Sungu Bay, Китай);
- 1.5) *комплексное воздействие на различные среды*. В работе (Congruy et al., 2009) имитируется влияние антропогенных нагрузок от различных источников на тропические экосистемы и биологическое разнообразие острова Реюньон.

2. АОМ, имитирующие влияние состояния экологии на заболеваемость и смертность населения. Примерами могут служить работы (Sokolova, Fernández-Caballero, 2012; Akopov et al., 2017), которые посвящены выявлению степени влияния загрязненности окружающей среды на заболеваемость населения, а также взаимосвязи конкретных видов загрязнения с типами заболеваний. Так, в работе (Sokolova, Fernández-Caballero, 2012) активные агенты представлены блоками или модулями, каждый из которых наделяется определенной функцией: агенты, отвечающие за сбор и обработку конкретного вида информации; подготовку предварительных данных для построения моделей

разного типа (регрессионных, нейронной сети, полиномиальных) и др. Модель была апробирована на реальных данных об уровнях заболеваемости и уровне загрязненности среды относительно предельно допустимых концентраций вредных веществ для одной из областей Испании за период 1989–2007 гг. В ходе проведенных компьютерных экспериментов удалось проследить влияние показателей уровня загрязнений на заболеваемость населения по видам болезней и возрастным когортам.

3. АОМ, имитирующие процессы управления экологической нагрузкой. В работе (Еременко, Доронина, 2010) представлена мультиагентная система управления экологической безопасностью региона. В модели имитируется взаимодействие органов власти и предприятий как поведение соответствующих агентов, причем агенты самостоятельно находят варианты и принимают индивидуальные решения, генерируя предложения по схемам управления. Агенты обучаются с помощью метода нечеткой нейронной сети и механизмов выбора стратегии. В (Beklaryan et al., 2016) агентами являются органы власти, которые воздействуют на агентов-предприятия через систему штрафов за загрязнение природной среды и/или субсидирование перехода на современные, более экологически чистые технологии производства. Агенты-предприятия стремятся максимизировать прибыль и одновременно минимизировать объемы выбросов, для чего они могут модернизировать производство и переходить на более прогрессивные технологии, если у них для этого достаточно финансовых средств. Модель создана путем объединения методов системной динамики и агент-ориентированного моделирования в среде имитационного моделирования AnyLogic² и использует субъектно-ориентированную базу данных, содержащую актуальную статистическую информацию о промышленных объектах, расположенных на территории Республики Армения.

3. Социо-эколого-экономическая агент-ориентированная модель региона

3.1. Концепция модели региона

Возвратимся к поставленной выше задаче — к созданию социо-эколого-экономической агент-ориентированной модели как инструмента апробации и настройки гибкого механизма экологического регулирования на уровне региона. Концепция модели как искусственного общества объединяет нескольких частных моделей (природная среда региона, социально-демографическая структура населения региона, структура экономики региона), чтобы имитировать взаимосвязи происходящих в этих сферах процессов. Модель способна демонстрировать динамику социально-экономических и экологических характеристик региона как результат взаимодействия множества самостоятельных акторов-агентов разного уровня, разнообразие которых воспроизво-

² AnyLogic — инструмент имитационного моделирования, который поддерживает различные подходы к созданию имитационных моделей, в том числе и агент-ориентированный (более подробно см.: <http://www.anylogic.ru>).

дит социальную структуру реального региона. Действующими агентами в модели являются люди и организации (предприятия), способные принимать сигналы из внешней среды и действовать в соответствии со своими интересами. Более крупные акторы, такие как административные единицы и регион в целом как административное образование и как часть экосистемы, служат для агентов внешней средой.

3.2. Основные блоки региональной АОМ

Население региона представлено популяцией агентов-людей, характеризующихся такими свойствами, как возраст, пол, уровень здоровья, уровень образования, сфера деятельности, опыт работы, доход и др. Эти свойства принимают у агентов различные значения в соответствии с данными о фактическом распределении этих свойств среди множества жителей конкретного моделируемого региона. Интегральной характеристикой полезности агента-человека трудоспособного возраста с точки зрения его участия в общественном производстве является трудовой потенциал, зависящий от уровня его здоровья, образования, трудолюбия и стажа работы.

Модель природной среды основана на многослойной карте территории региона (ГИС-карте), которая дополнена процедурами, позволяющими рассчитывать уровни загрязненности природной среды вредными веществами и их динамику как вследствие естественных причин, так и в результате деятельности человека. Расчеты уровней загрязненности проводятся отдельно для каждой среды (воздух, водные объекты), после чего агрегируются для получения интегральной оценки экологической нагрузки на территорию региона и сравнения с ее экологической емкостью (нагрузкой, которая еще не приводит к деградации и необратимым изменениям природной экосистемы). Далее на основе действующей методики оценки экологической обстановки территорий³ общее состояние экологии региона классифицируется по степени экологического неблагополучия в терминах лингвистической шкалы: «в пределах нормы», «экологический кризис» или «экологическое бедствие». Переход к худшей категории влечет изменения в параметрах смертности и заболеваемости населения.

Модель экономической жизни включает два аспекта: пространственный и функциональный. Пространственный аспект определяется территориальным размещением производства, необходимых для него ресурсов, развитием транспортной инфраструктуры и представлен соответствующей ГИС-картой. Функциональный аспект представлен моделью производства, описывающей зависимость результата деятельности агентов-предприятий от значения основных факторов при заданных правилах общественной жизни и уровнях технологий. Причем фактором труда служит агрегированный трудовой потенциал агентов-работников предприятий. Кроме того, агенты-предприятия производят отходы, что влияет на состояние природной среды. Объемы

³ Методика «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия». Утверждена Минприроды России 30.11.1992.

загрязнения разных сред связаны со спецификой вида деятельности агента-предприятия и зависят от его отраслевой принадлежности, объема его производства и уровня технологий. Агенты-предприятия могут управлять объемами выбросов с помощью выделения дополнительных средств на очистку отходов (в модели задаются удельные расходы на снижение концентрации загрязняющих веществ в отходах).

Общественное устройство отражено на карте административного деления. Оно включает множество критериев оценки социального, экономического и экологического благополучия региона в целом и отдельных административных единиц в его составе, а также систему полномочий в отношении находящихся на его территории агентов, куда входят в том числе ставки налогов и штрафные санкции за загрязнение природной среды. Изначально полномочия административных образований в модели соответствуют реальным правовым рамкам, однако они доступны для манипулирования пользователю модели при проведении компьютерных экспериментов.

Коротко работу АОМ-симулятора можно представить таким образом. В начале работы АОМ считывается необходимая исходная информация из базы данных, создаются популяции агентов-людей и агентов-организаций, распределяются их свойства и устанавливается стартовое состояние искусственного общества, воспроизводящее социально-экономическое положение региона в базовом году. Далее происходит переход к следующему шагу работы модели, соответствующему одному году в реальной действительности. На каждом шаге работы модели, в первую очередь в соответствии с состоянием экологии региона, корректируются показатели заболеваемости и смертности населения, а затем имитируются демографические процессы – вымирание агентов, появление (рождение) новых, миграция. Затем взрослые агенты анализируют доступную им информацию о характеристиках среды и о собственном положении в ней и производят выбор действия (они могут менять место работы и/или место жительства), после чего производится расчет трудового потенциала каждого работающего агента, а также агрегирование потенциалов внутри групп агентов-работников для каждого предприятия. Агрегированные потенциалы в качестве факторов труда используются при расчете результатов деятельности предприятий, а также при расчете объемов выбросов вредных веществ.

Отметим, что так как уровень загрязнения влияет на заболеваемость населения и показатели его смертности, то конструкция модели позволяет имитировать не только влияние деятельности людей на экономику и экологию региона, но и обратное влияние условий существования людей на их здоровье, работоспособность и поведение.

Реализация комплексного АОМ-симулятора происходит поэтапно по мере детализации отдельных функциональных блоков и усложнения конструкции модели для достижения большего правдоподобия имитации происходящих в жизни процессов. Важно подчеркнуть,

что при разработке большой АОМ применяется стратегия KISS (Keep it simple, stupid) (Фаджиоло, Ровентини, 2009, с. 39–40), которая требует достижения поставленных целей минимально возможными средствами. В нашем случае это означает, что на каждом этапе разработки модель способна быть инструментом решения некоторого круга прикладных задач, для чего имитирует связанные с ними процессы. (Например, демографический блок модели позволяет получать прогнозы численности и возрастно-половой структуры населения. Работа этого блока была апробирована на реальных ретроспективных данных, причем максимальное отклонение от факта для численности населения составило не более 1%.)

Усложнение конструкции модели производится на следующем этапе для расширения ее функционала и адаптации к решению новых задач. Усложнение может потребовать не только добавления новых свойств агентов и их среды, но и добавления новых объектов этой среды. С точки зрения программной реализации добавление новых объектов означает добавление новых формальных конструкций («классов», в терминологии современного объектно-ориентированного программирования), которые будут представлять эти объекты в искусственном обществе.

В свете поставленной задачи особую роль играет разработка конструкций, способных имитировать процессы взаимодействия экономических акторов в случае применения различных механизмов регулирования.

4. Разработка блока экологического регулирования в искусственном обществе

4.1. Развитие механизмов имитации экологического регулирования

В качестве основы гибкого механизма экологического регулирования в модели взят механизм торговли квотами на выбросы, реализующий бабл-принцип. Суть механизма заключается в том, чтобы поддерживать заданный уровень загрязнения в регионе. Механизм позволяет предприятиям региона, которым удалось снизить суммарный выброс загрязняющего вещества ниже установленного для них уровня, продавать излишки сокращения выбросов предприятиям своего региона, которые превысили свою квоту. Предприятиям предоставляется выбор платить штрафы, покупать/продавать квоты на выбросы, устанавливать системы очистки или модернизировать производство, если они сохраняют при этом суммарную экологическую нагрузку в пределах региона. Это действительно гибкий механизм, так как он позволяет предприятиям выбирать наиболее целесообразную экономически стратегию достижения заданных экологических нормативов.

Для определения наиболее перспективных направлений обобщения задачи экологического регулирования в искусственном обще-

стве на основе бабл-принципа и развития программного обеспечения для ее решения проанализируем ключевые особенности и соответствующие ограничения механизма торговли квотами на выбросы.

Во-первых, речь идет о выбросах вредных (т.е. негативно влияющих на здоровье человека и на состояние всей окружающей среды) веществ в атмосферу. Однако в результате хозяйственной деятельности человека загрязняется не только атмосфера, но и другие составляющие среды обитания – водные ресурсы, почва. И негативное влияние различных видов загрязнений на состояние окружающей среды комплексное, хотя структура экологической нагрузки, как вклад в нее отдельных типов загрязнений, индивидуальна для каждого региона.

Во-вторых, речь идет о стационарных источниках выбросов, в основном связанных с деятельностью промышленных предприятий. Однако источниками загрязнения зачастую служат нестационарные объекты, например, в загрязнении воздуха на территории крупных городов большую роль играет автотранспорт (см. таблицу). Для снижения объема выбросов от автотранспорта применяются другие методы регулирования – от контроля качества реализуемого топлива и введения стандартов на содержание вредных веществ в выхлопных газах автомобилей до ограничения движения большегрузного транспорта.

В-третьих, ключевым понятием механизма торговли квотами на выбросы является бабл-принцип. Этот принцип действует на территории региона, на которой расположены источники выбросов определенного вида, а их поведение регионом регулируется для снижения суммарного объема выбросов. Но для разных видов загрязнений, с учетом механизмов их распространения, состав источников, оказывающих негативное воздействие на территорию региона, может быть разным,

Таблица

Доля выбросов автотранспорта в выбросах вредных веществ в крупных городах мира

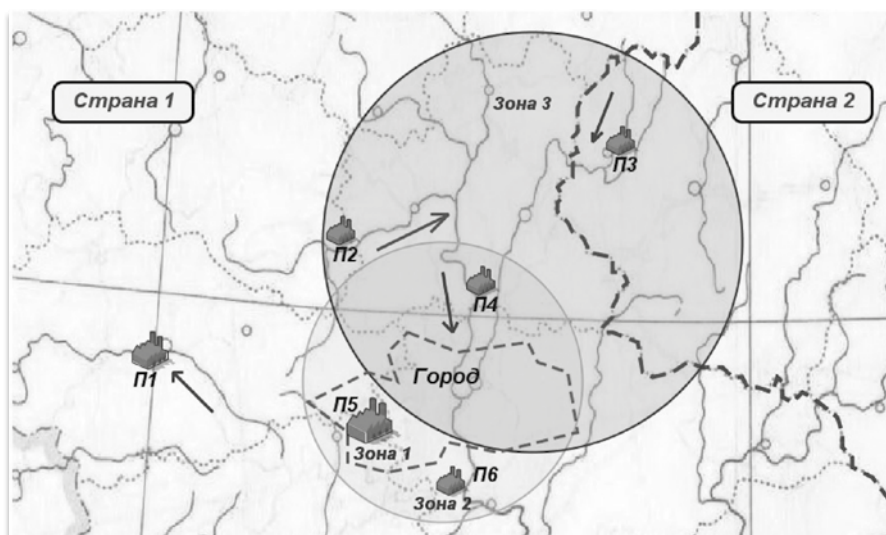
Город	Доля выбросов автотранспорта от общего количества выбрасываемых веществ, (%)		
	Оксид углерода	Углеводороды	Оксиды азота
Санкт-Петербург	88	79	32
Лос-Анджелес	98	66	72
Мадрид	95	90	35
Нью-Йорк	97	63	31
Стокгольм	99	93	53
Токио	99	95	33
Торонто	98	69	19

Источник: (Ситдикова и др., 2015).

причем часть этих источников может находиться достаточно далеко от региона и вне пределов его юрисдикции. Схематично эта ситуация проиллюстрирована на рисунке. На нем обозначены реки, город и шесть предприятий {П1, ..., П6}. Каждое предприятие считается источником выбросов в атмосферу и реки. На рисунке справа пунктиром проведена граница, разделяющая территорию на два государства (Страна 1 и Страна 2).

Объект, для которого требуется оценить суммарную экологическую нагрузку от всех видов выбросов в атмосферу и в водоемы, – это Город, чья территория ограничена пунктирной линией. Автомобили загрязняют выхлопными газами воздух в городе, и его территория обозначена как зона регулирования данного вида источников загрязнения (Зона 1). На уровень загрязнения воздуха в городе влияют три предприятия, одно из которых (П5) расположено на территории города, а два других (П4, П6) – на небольшом расстоянии от него. Все они включаются в зону регулирования стационарных источников выбросов в атмосферу с помощью торговли квотами (Зона 2). Загрязнение воды в городе происходит по вине трех предприятий (П2, П3, П4), расположенных выше по течению реки, протекающей по территории города, а также вдоль ее притоков (направление течения показано на рисунке стрелками) (Зона 3). Внутри этой зоны может действовать свой механизм регулирования выбросов, отличный от механизма торговли квотами.

Заметим, что предприятие П1 не вошло ни в одну зону, так как расположено далеко от города и на территории бассейна другой реки.



Рисунок

Пример расположения источников загрязнений разных видов и выделения зон действия различных механизмов регулирования

А предприятие П6 хотя и расположено близко к городу и включено в Зону 2, но находится ниже по течению реки, поэтому не включено в Зону 3. Отдельную проблему демонстрирует расположение предприятия П3 на территории другой страны. Ведь сбросы из этого источника влияют на экологию города, но данное предприятие не подчиняется системе экологического регулирования, действующей в Стране 1. Механизмы совместного водопользования странами, расположенными вдоль бассейна большой реки, смоделированы на примере реки Нил в работе (Ding et al., 2016), хотя там речь идет о проблеме распределения водных ресурсов между потребителями разных стран.

В-четвертых, торговля квотами на выбросы — только один из механизмов экологического регулирования, и его применение не гарантирует решения всех проблем, связанных с выбросами в атмосферу. В частности, объемы выбросов CO_2 предприятиями электроэнергетики, на долю которых, например, в России приходится свыше 80% общего объема выбросов парниковых газов (Экология и экономика..., 2017, с. 8), существенно зависят от вида используемых энергоносителей. Однако в работе (Chappin, Dijkema, 2009, с. 367) показано, что в производстве электроэнергии экономического эффекта от торговли выбросами CO_2 недостаточно для того, чтобы стимулировать предприятия отказаться от выбора угля и перейти на более экологичные энергоносители. В этой связи интерес представляют другие факторы, способствующие переходу электроэнергетики на возобновляемые источники энергии, которые могут быть использованы для развития механизмов регулирования. Например, в работе (Kazemilar et al., 2018) исследуются взаимосвязи показателей фондового рынка и развития альтернативной энергетики.

Развитие разрабатываемой модели, расширение ее функционала проводилось в направлении преодоления замеченных ограничений, чтобы модель могла использоваться для апробации различных мер регулирования и комплексного решения проблем загрязнения различных сред. В первую очередь было модифицировано понятие “bubble” — в концепции модели оно означает множество объектов / субъектов, выбросы которых агрегируются в рамках применения одного из механизмов экологического регулирования. Очевидно, что эти множества могут пересекаться в том случае, когда один объект/субъект производит выбросы разных видов.

В то же время территория, для которой оценивается экологическая нагрузка, в модели рассматривается как объект другого рода — административная единица, в интересах которой осуществляется экологическое регулирование. Для этой территории рассчитывается суммарное по всем видам выбросов негативное воздействие, которое требуется в ходе компьютерных экспериментов удерживать в пределах заданных нормативов, используя различные способы регулирования для разных типов источников. Такой подход позволяет оценивать результаты вве-

дения планируемого комплекса мер как на уровне страны, власти которой являются регулятором, так и на уровне отдельных административных единиц на ее территории, что может стать особенно важным, если имеются зоны экологического неблагополучия, для улучшения положения в которых необходимо введение дополнительных мер.

Кроме того, функционал создаваемой АОМ был дополнен в части обеспечения возможностей пользователя задавать параметры различных механизмов регулирования и сферы их применения.

Для реализации расширенного функционала модели потребовалось ввести новый тип объекта (и соответствующий класс в структуре программного обеспечения) – механизм регулирования, параметрами которого являются: субъект регулирования; правила, по которым выделяются группы объектов регулирования; регулируемые нормативы и т.д. Причем новый тип объектов непосредственно связан с интерфейсом модели таким образом, что пользователь получает возможность в ходе эксперимента как вводить новые механизмы регулирования, так и корректировать параметры уже функционирующих механизмов.

4.2. Имитируемые в АОМ процессы

Для обеспечения представленного выше функционала в искусственном обществе имитируются следующие процессы:

- *воспроизводство населения.* Процессы естественного движения населения имитируются на основе агрегирования действий отдельных агентов-людей, которые с течением модельного времени стареют, а затем и умирают (что имитирует смертность). Во взрослом возрасте агенты могут создавать новых агентов (рождаемость), а также менять место жительства (миграция) и место работы. Кроме того, агенты могут владеть автомобилями, что включает их в число источников выбросов в атмосферу;
- *производство продукции агентами-предприятиями различных отраслей.* Связь объема производства предприятий и объема выбросов осуществляется на основе производственных функций, которые различаются по отраслям, что аналогично подходу, представленному в работе (Дружинин, Шкиперова, 2012). Но при этом в явном виде задается стоимость качественного перехода к новым технологиям – новым производственным функциям, которые при использовании тех же ресурсов изменяют и объем выпуска продукции, и объем выбросов;
- *распространение загрязнений.* Распространение загрязняющих веществ в атмосфере имитируется с учетом данных о розе ветров для данной местности, а также с учетом их частичной компенсации за счет наличия на ней лесных массивов. Если таких данных нет, то считается, что загрязнение распространяется равно-

мерно во все стороны от источника. Для имитации распространения загрязнений в бассейнах рек применяется модель оценки качества воды в разветвленной системе водотоков (Водные ресурсы..., 2010, с. 212–225). Система водотоков для этого схематизируется в виде направленного графа, по дугам которого (участкам рек) на основе решения дифференциальных уравнений имитируется распространение загрязнений, причем учитывается способность воды к самоочищению;

- *агрегирование разных видов загрязнений в пределах территории.* Вначале происходит суммирование выбросов внутри каждого bubble, связанного с этой территорией. Затем полученные значения суммируются отдельно по средам. После чего осуществляется агрегирование загрязнений разных видов с учетом значимости их негативного влияния на здоровье людей и состояние природной среды для расчета интегральной оценки уровня экологического неблагополучия. Уровень неблагополучия затем выражается в терминах лингвистической шкалы: «в пределах нормы», «экологический кризис» или «экологическое бедствие», что влияет на уровень заболеваемости и смертности в соответствии с методикой оценки экологической обстановки территорий⁴;
- *изменение параметров среды в результате введения механизмов регулирования.* Обеспечивается с помощью функционального блока интерфейса модели, принимающего введенные пользователем параметры механизма регулирования и формирование соответствующего bubble с указанными свойствами. Для нового bubble также формируется список (коллекция) агентов / объектов АОМ, удовлетворяющих заданным критериям отбора целевой группы;
- *действия экономических агентов в ответ на изменения условий среды в результате мер экологического регулирования.* Процедуры выбора агентами способа действий из возможных вариантов учитывают свойства внешней среды (экологические нормативы, штрафы за их превышение, возможность торговли выбросами и т.д.). Связь агентов, которых затрагивают изменения, введенные в том или ином механизме, осуществляется через список в соответствующем bubble. Если агент подпадает под действие нескольких механизмов регулирования, то он минимизирует свои суммарные затраты на соответствие экологическим нормативам. При невозможности достижения такого соответствия агент-человек, например, отказывается от автомашины, а агент-предприятие в этом случае должно обанкротиться. Пока в модели процедура банкротства не проработана, поэтому пользователю сообщается статистика о популяции агентов, в том числе об агентах-банкротах.

⁴ Методика «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия». Утверждена Минприроды России 30.11.1992.

4.3. Работа АОМ

В этом пункте будет обобщенно представлен алгоритм работы симулятора и взаимодействия с ним пользователя в ходе компьютерного эксперимента (в виде псевдокода).

АЛГОРИТМ РАБОТЫ СИМУЛЯТОРА

Считывание исходной информации из базы данных.

Установка начального состояния системы в базовом году.

Создание популяций агентов-людей и агентов-предприятий и распределение их свойств.

Номер шага имитации $i = 0$.

Цикл по шагам имитации – пока пользователь не прекратит эксперимент:

- имитация процессов производства, образования выбросов и их распространения;
- сбор статистики о состоянии популяций агентов и системы в целом;
- демонстрация текущего состояния системы на экране интерфейса;
- прием управляемых пользователем параметров.

Цикл по механизмам регулирования (МР) – пока не кончится коллекция МР, имитируемых в модели:

- актуализация коллекции объектов, подпадающих под действие МР;
- расчет мер воздействия для каждого объекта из коллекции.

Окончание цикла по МР.

Цикл по популяции агентов:

- взаимодействие агентов и выбор ими стратегий поведения при текущих параметрах внешней среды (в частности, торговля выбросами);
- имитация действий агентов.

Окончание цикла по популяции агентов.

Переход к следующему шагу имитации (году): $i = i + 1$.

- Имитация процессов воспроизводства населения.

Окончание цикла по шагам имитации.

5. Заключение

В работе поставлена задача: разработка конструкции социо-эколого-экономической агент-ориентированной модели, способной стать инструментом апробации комплекса мер экологического регулирования на уровне региона.

Ключевые положения концепции модели:

- модель разрабатывается для искусственного общества, в рамках которого объединяются нескольких частных моделей (природная среда региона, социально-демографическая структура населения региона, структура экономики региона), чтобы имитировать взаимосвязи происходящих в этих сферах процессов;
- модель является симулятором, который демонстрирует динамику социально-экономических и экологических характеристик

региона как результат активности множества самостоятельных акторов разного уровня (агенты-люди и агенты-предприятия), разнообразие которых воспроизводит социальную структуру реального региона;

- активность агентов означает их способность совершать действия, в том числе в ответ на предъявляемые требования к объемам выбросов вредных веществ в окружающую среду;
- экологические требования являются элементами различных механизмов регулирования, реализующихся в модели на основе обобщенного бабл-принципа. Параметрами указанных механизмов служат субъект регулирования; правила, по которым выделяются группы объектов регулирования; регулируемые нормативы; и т.д.;
- интерфейс модели предоставляет пользователям широкие возможности для модификации действующих механизмов регулирования, а также для введения новых.

В результате такого подхода в модели – на основе имитации поведения отдельных агентов – воспроизводятся экономические, экологические, социальные процессы и прогнозируется их развитие с учетом экологических требований. А интерфейс модели позволяет управлять этими процессами в ходе компьютерных экспериментов, сочетая разные механизмы регулирования для разных групп агентов региона и видов выбросов и добиваясь улучшения общего состояния экологии.

Следует подчеркнуть, что, по мнению авторов, представленная конструкция (названная обобщенным бабл-принципом) позволяет описывать и вводить в работу симулятора самые разные механизмы регулирования, например экологические налоги, базой для которых является именно физическая характеристика объекта обложения (Громов, 2014). Очевидно, что для введения в модель механизмов, основанных на компенсации ущерба от выбросов (в первую очередь налогообложение в духе Пигу), необходима разработка блока стоимостной оценки этого ущерба.

Представленная конструкция АОМ была реализована в виде прототипа модели в среде Visual Studio на языке C# и прошла апробацию на условных данных об уровне штрафов, объемах выбросов, квотах на эти выбросы и стоимости модернизации производства. Эксперименты, в которых экологическое регулирование осуществлялось с помощью механизмов торговли квотами на выбросы в атмосферу от стационарных источников, проводились для нескольких, также условных, предприятий региона одной отрасли, различающихся уровнем технологического развития. В ходе экспериментов ужесточались требования к объемам выбросов предприятий и штрафные санкции за их превышение, что вызывало адекватную реакцию агентов. Так, ужесточение экологических требований вынуждало предприятия выбирать более долгосрочное решение проблемы выбросов и переходить на следующую

ший уровень технологии. Однако в силу условности использованных в экспериментах данных количественно оценивать эффекты от реализации рассмотренного механизма регулирования на основе результатов экспериментов было бы некорректным.

На наш взгляд, предложенная конструкция модели может служить основой при разработке инструмента для апробации различных механизмов регулирования экологической сферы на уровне региональных органов власти, для чего потребуется использование реальных данных.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В.** (2008). Механизмы управления эколого-экономическими системами. М.: Издательство физико-математической литературы. [**Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V.** (2008). *Control mechanisms of ecological and economic systems*. Moscow: Izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury (in Russian).]
- Водные ресурсы и качество вод: состояние и проблемы управления (2010). В.И. Данилов-Данильян, В.Г. Пряжинская (ред.). М.: РАСХН. [*Water resources and water quality: Status and management problems* (2010). V.I. Danilov-Danilian, V.G. Pryazhinskaya (eds.). Moscow: RASKhN (in Russian).]
- Громов В.В.** (2014). Экологические налоги: классическое и современное понимание сущности // *Экономика, статистика и информатика*. № 4. С. 41–45. [**Gromov V.** (2014). Environmental taxes: Classical and contemporary concepts of the essence. *Economics, Statistics and Informatics*, 4, 41–45 (in Russian).]
- Дружинин П.В., Шкиперова Г.Т.** (2012). Эколого-экономические модели и прогнозы в системе регионального управления // *Проблемы прогнозирования*. № 1. С. 88–97. [**Druzhinin P.V., Shkiperova G.T.** (2012). Ecological and economic models and forecasts in the system of regional management. *Studies on Russian Economic Development*, 1, 88–97 (in Russian).]
- Еременко Ю.И., Доронина Е.Г.** (2010). Модель адаптивного поведения агентов мультиагентной системы управления экологической безопасностью // *Прикладная информатика*. № 2 (26). С. 71–82. [**Eremenko Yu.I., Doronina E.G.** (2010). The Model of adaptive behavior of agents in multi-agent environmental safety management system. *Applied Informatics*, 2 (26), 71–82 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.** (2015). Агент-ориентированная социолого-экономическая модель региона // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. № 3. С. 2–11. [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D.** (2015). Agent-based social, ecological and economic models of region. *National Interests: Priorities and Security*, 3, 2–11 (in Russian).]
- Ситдикова А.А., Святова Н.В., Царева И.В.** (2015). Анализ влияния выбросов автотранспорта в крупном промышленном городе на состояние загрязнения атмосферного воздуха // *Современные проблемы науки и образования*. № 3. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19623> [**Sitdikova A.A., Svyatova N.V., Tsareva I.V.** (2015). Analysis

of the Impact of Motor Vehicle Emissions in the Large Industrial City on the State of Air Pollution. *Modern Problems of Science and Education*, 3. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19623> (in Russian).]

- Трейман М.Г., Юдин А.П.** (2014). Применение «бубл-принципа» для водных объектов на примере акватории реки Нева // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*. № 2. Режим доступа: http://economics.iibt.ifmo.ru/ru/article/11124/primenenie_%C2%ABbubl-principa%C2%BB_dlya_vodnyh_obektov_na_primere_akvatorii_reki_neva.htm [**Treiman M.G., Yudin A.P.** (2014). The application of the “Principle for the bubble” of water bodies in the river Neva. *Scientific Journal NRU ITMO Series “Economics and Environmental Management”*, 2. Available at: http://economics.iibt.ifmo.ru/ru/article/11124/primenenie_%C2%ABbubl-principa%C2%BB_dlya_vodnyh_obektov_na_primere_akvatorii_reki_neva.htm (in Russian).]
- Фаджиоло Д., Ровентини А.** (2009). О научном статусе экономической политики: повесть об альтернативных парадигмах // *Вопросы экономики*. № 6. С. 24–47. [**Fagiolo G., Roventini A.** (2009). On the scientific status of economic policy: A tale of alternative paradigms. Translated from the English. Originally published by Universita di Verona, Dipartimento di Scienze economiche, 2009. *Working Paper No. 47* (in Russian).]
- Экология и экономика: сокращение загрязнения атмосферы страны (2017). *Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики*. Вып. 28. М.: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. [Ecology and economy: Reduction of the country’s atmospheric pollution (2017). *Bulletin on the current trends of the Russian economy*. Issue 28. Moscow: Analytical Center under the Government of the Russian Federation (in Russian).]
- Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian A.K.** (2017). Agent-based modelling for ecological economics: A case study of the republic of Armenia. *Ecological Modelling*, 346, 99–118.
- Athanasiadis I.N.** (2005). A review of agent-based systems applied in environmental informatics. *Proceedings of International congress on modelling and simulation advances and applications for management and decision making (MODSIM05)*, 1574–1580.
- Beklaryan L.A., Akopov A.S., Beklaryan A.L., Saghatelian A.K.** (2016). Agent-based simulation modeling for regional ecological-economic systems. A case study of the Republic of Armenia. *Machine Learning and Data Analysis*, 2, 1, 104–115.
- Burtraw D., Szambelan S.J.** (2009). U.S. Emissions trading markets for SO₂ and NO_x. *Discussion paper 09–40*. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1490037
- Chappin E.J.L., Dijkema G.P.J.** (2009). On the impact of CO₂ emission-trading on power generation emissions. *Technological Forecasting & Social Change*, 76, 358–370.
- Conruyt N., Sébastien D., Courdier R., David D., Sébastien N., Ralambondrainy T.** (2009). Designing an information system for the preservation of the insular tropical environment of Reunion Island. Integration of databases, knowl-

- edge bases and multi-agent systems by using Web services. In: C.G. Ulise, P. Manel (eds.). *Advanced Agent-Based Environmental Management Systems*. Basel: Birkhäuser, 61–91.
- Corchado J.M., Mata A., Rodriguez S.** (2009). OSM: A multi-agent system for modeling and monitoring the evolution of oil slicks in Open oceans. In: C.G. Ulise, P. Manel (eds.). *Advanced Agent-Based Environmental Management Systems*. Basel: Birkhäuser, 91–117.
- Ding N., Erfani R., Mokhtar H., Erfani T.** (2016). Agent based modelling for water resource allocation in the transboundary Nile river. *Water*, 8 (4). 139. DOI: 10.3390/w8040139
- Ghazi S., Khadir T., Dugdale J.** (2014). Multi-agent based simulation of environmental pollution issues: A review. In: J.M. Corchado et al. (eds.). *Highlights of Practical applications of heterogeneous multi-agent systems. The PAAMS collection. PAAMS 2014. Communications in computer and information science*. Cham: Springer, 430, 13–21.
- Handbook of research on agent-based societies: Social and cultural interactions* (2009). G. Trajkovski, S.G. Collins (eds.). New York: Information Science Reference Hershey.
- Kazemilar M., Mohamadi A., Mardani A., Streimikiene D.** (2018). Network Topology of Renewable Energy Sector in Stock Exchange. *Montenegrin Journal of Economics*, 14, 2, 167–174.
- Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on climate change (1997). Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- Pereira A., Reis L.P., Duarte P.** (2009). EcoSimNet: A multi-agent system for ecological simulation and optimization. In: L.S. Lopes, N. Lau, P. Mariano, L.M. Rocha (eds.). *Progress in artificial intelligence. EPIA 2009. Lecture notes in computer science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 5816, 473–484.
- Pulter N., Schepperle H., Böhm K.** (2011). How agents can help curbing fuel combustion: A performance study of intersection control for fuel-operated vehicles. *Proceedings of 10th Int. conf. on autonomous agents and multiagent systems – Innovative applications track (AAMAS 2011)*, 795–802.
- Shindler J.** (2009). *A multi-agent system for simulating land-use and land-cover change in the Atankwidi catchment of Upper East Ghana*. PhD thesis. Bonn: Rheinischen Friedrich Wilhelms Universität.
- Sokolova M.V., Fernández-Caballero A.** (2012). Evaluation of environmental impact upon Human Health with DeciMaS Framework. *Expert Systems with Applications*, 39, 3469–3483.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). *Emission reductions* (2017). Available at: https://www3.epa.gov/airmarkets/progress/reports/emissions_reductions_so2.html#figure2
- Wolf S., Schütze F., Jaeger C.C.** (2016). Balance or synergies between environment and economy – a note on model structures. *Sustainability*, 8 (8), 761. DOI: 10.3390/su8080761
- Yang S., Qu H., Luan S., Kroeze C.** (2014). Environmental implications of rural policies in China: A multi-agent model at the level of agricultural households. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 11, 1, 17–37.

Поступила в редакцию 23.02.2019

Received 23.02.2019

V.L. Makarov

Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

A.R. Bakhtizin

Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E.D. Sushko

Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Agent-based model as a tool for controlling environment of the region⁵

Abstract. To create an integrated environmental management system that encourages economic actors to reduce emissions of pollutants into the environment, it is necessary to use tools for preliminary assessment of the effects of the implementation of planned measures. One of such tools can be an agent-based regional socio-ecological-economic model. In the design of the model developed by the authors, there are populations of human agents and agent enterprises. Each human agent participates in demographic processes and contributes to the production activities of agent enterprises. And each agent-company, except for products, also produces emissions into the atmosphere and water bodies. All types of pollution have a cumulative impact on the ecology of the region, which affects the health and mortality rates of human agents. Agents can reduce their emissions through actions available to them in response to environmental requirements that are established under various emission control mechanisms. The user of the model in the course of computer experiments can change the parameters of existing mechanisms and create new ones.

Keywords: *agent-based modeling, pollution control, ecological economics, incentive-based regulation, market-based instrument, bubble principle.*

JEL Classification: C63, Q52, Q53, Q58.

DOI: 10.31737/2221-2264-2020-45-1-6

⁵ This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 17-02-00416).