

УДК 332.14; 502.33; 004.94

УПРАВЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЕЙ РЕГИОНА: АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД

В.Л. Макаров

Центральный экономико-математический институт РАН
Россия, 117418, Москва, Нахимовский проспект, 47
E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

А.Р. Бахтизин

Центральный экономико-математический институт РАН
Россия, 117418, Москва, Нахимовский проспект, 47
E-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

Е.Д. Сушко

Центральный экономико-математический институт РАН
Россия, 117418, Москва, Нахимовский проспект, 47
E-mail: sushko_e@mail.ru

А.Ф. Агеева

Центральный экономико-математический институт РАН
Россия, 117418, Москва, Нахимовский проспект, 47
E-mail: ageevaalina@yandex.ru

Ключевые слова: задачи управления, агент-ориентированное моделирование, загрязнение окружающей среды, рыночные инструменты регулирования, стимулирующее регулирование.

Аннотация: Для создания комплексной системы экологического регулирования необходимо использование инструментов предварительной оценки эффектов от реализации различных механизмов. Одним из таких инструментов может стать разработанная авторами агент-ориентированная социо-эколого-экономическая модель региона. В модели-симуляторе присутствуют популяции агентов-людей и агентов-предприятий. На основе действий агентов имитируются процессы воспроизводства населения, промышленного производства, а также производства отходов, загрязняющих окружающую среду. Все виды выбросов оказывают суммарное воздействие на экологию региона, что влияет на показатели здоровья и смертности агентов-людей. Агенты могут сокращать объемы своих выбросов в ответ на экологические требования, которые устанавливаются в рамках различных механизмов регулирования.

Снижение объема выбросов вредных веществ в окружающую среду сохраняет свою актуальность. Например, проблемы, связанные с высоким содержанием загрязняющих веществ в атмосфере, остаются во многих промышленно развитых регионах страны (так, по данным наблюдения Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова в 243 городах России – в 2016 году 20 из них вошли в список городов с очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха, а в 24-х зафиксирован высокий уровень загрязнения¹). Поэтому для решения этой важнейшей задачи необходи-

¹ URL: <http://voeikovmgo.ru/index.php?id=681&lang=ru>.

мо использовать все возможные административные и экономические меры воздействия на экономических акторов, служащих источниками загрязнений. Для выбора оптимальных стратегий эколого-экономического регулирования на региональном уровне чрезвычайно полезным было бы использование модельного инструментария, позволяющего в ходе компьютерных экспериментов оценивать последствия применения различных управленческих мер и их сочетаний.

В работах [1, 2] представлен анализ различных механизмов управления эколого-экономическими системами, включая оптимизационные, теоретико-игровые и имитационные модели. В работе [1] 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 в улучшении экологического поведения, таких, например, как продажа квот на выбросы.

Среди современных подходов к моделированию больших социально-экономических все большее распространение приобретает моделирование имитационное, особенно агент-ориентированное [3, 4]. Большая (или активная) система в данном случае понимается в терминологии В.Н. Буркова [5], то есть, как система, включающая самостоятельных акторов, действующих в соответствии со своими интересами и возможностями. При агент-ориентированном подходе имитируются именно действия отдельных самостоятельных акторов (которые представлены в агент-ориентированной модели агентами), а состояние 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. Причем, в агент-ориентированной модели (АОМ) можно создавать сколь угодно большое число агентов, наделенных индивидуальными характеристиками (то есть, с различающимися значениями характеристик у отдельных агентов), значимыми в смысле их участия в экономической жизни и воздействия на экологическое состояние региона. Именно такое построение «снизу вверх» цифрового аналога реальной большой социально-экономической системы позволяет воссоздать в искусственной среде все особенности ее социальной структуры и добиться максимального правдоподобия при имитации происходящих в ней процессов.

Целью исследования является разработка региональной АОМ, воссоздающей внутреннюю структуру и правила функционирования региона как сложной социо-эколого-экономической системы, включающей самостоятельно действующих экономических акторов разного уровня – людей-жителей региона, предприятий на его территории, – и имитирующей реакцию этих акторов на меры регулирования выбросов. Предназначение такой АОМ – служить инструментом предварительной оценки эффектов от реализации различных мер регулирования.

Начало разработки нашей региональной АОМ было положено в работе [6], в которой были представлены концепция и конструкция модели как искусственного общества. Модель должна объединить нескольких частных моделей – природной среды региона, социально-демографической структуры его населения, а также структуры его экономики с тем, чтобы имитировать взаимосвязи происходящих в этих сферах процессов. Основные блоки региональной социо-эколого-экономической АОМ:

- **Население региона.** Представлено популяцией агентов-людей, обладающих такими свойствами как возраст, пол, уровень здоровья, уровень образования, сфера деятельности, опыт работы, доход и др. Эти свойства принимают у разных агентов различные значения в соответствии с данными о фактическом распределении указанных характеристик среди множества жителей 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 в результате деятельности человека. Расчеты уровней загрязненности проводятся отдельно для каждой из сред (воздух, водные объекты), после чего агрегируются для получения интегральной оценки экологической нагрузки на территорию региона и сравнения с экологической емкостью этой территории (нагрузкой, которая еще не приводит к деградации и необратимым изменениям природной экосистемы). Далее на основе действующей Методики оценки экологической обстановки территорий [7], общее состояние экологии региона классифицируется по степени экологического неблагополучия по следующим категориям: «в пределах нормы», «экологический кризис» или «экологическое бедствие». Переход региона к худшей категории влечет изменения в параметрах смертности и заболеваемости населения.
- **Модель экономической жизни.** Включает два аспекта, первый из которых определяется территориальным размещением производства, необходимых для него ресурсов, развитием транспортной инфраструктуры и основан на соответствующей ГИС-карте. А второй аспект представлен моделью производства как зависимостью результата деятельности агентов-предприятий от значения определяющих результат факторов при заданных правилах общественной жизни и уровне технологий. Причем, фактором труда служит агрегированный трудовой потенциал агентов-работников предприятий. Кроме того, агенты-предприятия производят отходы, что влияет на состояние природной среды. Объемы загрязнения разных сред связаны со спецификой вида деятельности агента-предприятия и зависят от его отраслевой принадлежности, от объема производства и уровня технологии. Агенты-предприятия также могут управлять объемами выбросов с помощью выделения дополнительных средств на очистку отходов.
- **Общественное устройство.** Основано на карте административного деления. 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. Полномочия административных образований в модели изначально соответствуют реальным правовым рамкам, однако они доступны для манипулирования пользователю модели при проведении компьютерных экспериментов.

Представленная конструкция АОМ последовательно реализуется и усложняется по мере разработки указанных блоков. К настоящему времени полностью реализованы и апробированы на реальных данных блоки, связанные с имитацией естественного движения населения. Разработан и апробирован на условных данных блок, имитирующий механизм регулирования выбросов вредных веществ в атмосферу от стационарных источников, основанный на торговле квотами на выбросы [8]. Агенты-предприятия в этом блоке модели, кроме продукции, производят также выбросы, укладываясь в установленные для них ограничения по выбросам (квоты) или же превышая их и выплачивая за это превышение штрафы. Агенты-предприятия могут участвовать в торговле квотами на выбросы, то есть, продавать излишки квоты другим предприятиям или покупать недостающую им квоту, если это выгоднее, чем платить штрафы. Кроме того, агенты-предприятия могут улучшать очистку выбросов или модернизировать производство, добиваясь кардинального снижения содержания вредных веществ в выбросах.

Управляемыми параметрами модели, которые пользователь может варьировать в ходе экспериментов, являются уровни штрафов за превышение предприятиями квот на выбросы различных вредных веществ, а также требования к снижению суммарных для региона выбросов, представленные в модели соответствующими понижающими коэффициентами.

В настоящее время разрабатываются блоки, в которых имитируются:

- *Процессы загрязнения воздушного бассейна региона.* Алгоритм, имитирующий в АОМ распространение загрязняющих веществ в атмосфере, призван позволять рассчитывать (оценивать) уровень концентрации каждого из учитываемых в модели основных видов загрязнений в любой точке в пределах моделируемой территории. Поэтому он учитывает основные факторы, влияющие на концентрацию вредных веществ в атмосфере. Для имитации выбросов от стационарных источников такими факторами являются: а) геометрическая высота устья источника выбросов по отношению к среднему уровню (высоты) зоны активного загрязнения; б) характер рассеяния каждого вида загрязняющих веществ, а именно: скорость оседания; наличие одновременного выброса паров воды или других веществ, вызывающих быструю конденсацию и др.; в) топология зоны активного загрязнения, зависящая от высоты факела выбросов и разности температур в устье источника (трубы) и в окружающей атмосфере; г) данные о розе ветров для местности, в которой расположена зона активного загрязнения; д) тип загрязняемой территории, что влияет на возможность частичной компенсации выбросов за счет наличия лесных массивов. Если таких данных нет, то считается, что загрязнение распространяется равномерно во все стороны от источника, так же, как и при имитации распространения выбросов от нестационарных источников, к которым в модели относятся выбросы от автотранспорта.
- *Процессы загрязнения водного бассейна региона.* Алгоритм, имитирующий в АОМ распространение загрязняющих веществ в водном бассейне, также призван позволять рассчитывать (оценивать) уровень концентрации каждого из учитываемых в модели основных видов загрязнений в любой точке водного бассейна в пределах моделируемого региона. Для имитации распространения загрязнений в бассейнах рек используется модель оценки качества воды в разветвленной системе водотоков [9]. 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. Таким образом, алгоритм имитации распространения загрязнений в водной среде учитывает основные факторы, влияющие на концентрацию в ней вредных веществ. Для имитации сбросов от стационарных источников такими факторами являются: а) топология зоны активного загрязнения, зависящая как от свойств графа, имитирующего в АОМ систему водотоков региона, так и от протяженности отдельных участков водотока; б) данные о скорости водотоков по дугам графа, зависящие от рельефа местности, в которой расположена зона активного загрязнения; в) данные о глубине и размахе отдельных участков водотоков и сезонных колебаниях этих характеристик; г) данные о скорости рассеяния каждого вида загрязняющих веществ в толще воды; д) уровень базового загрязнения водотоков, соответствующих дугам графа, а также способность их к самоочищению, что влияет на возможность частичной компенсации сбросов. При моделировании загрязнения водного бассейна региона учитываются также сбросы от стационарных источников за его пределами, расположенных на территории бассейнов рек, протекающих по территории региона и расположенных выше по течению. То есть, сбросы от тех ис-

точников, зона активного загрязнения для которых распространяется на территорию региона.

- *Влияние экологической нагрузки на состояние здоровья населения и величину его трудового потенциала.* Оценивая в АОМ именно суммарную экологическую нагрузку, как степень загрязнения всех компонентов окружающей человека среды, мы получаем возможность имитировать в модели динамику состояния экологии региона в целом. А критерии изменения показателей смертности и заболеваемости, указанные в Методике позволяют откалибровать модель таким образом, чтобы адекватно имитировать влияние состояния экологии на здоровье населения с учетом кумулятивного эффекта от загрязнений разных видов. Поскольку показатели здоровья входят как один из элементов рассчитываемого в модели трудового потенциала агентов-людей, снижение показателей здоровья вследствие ухудшения экологии региона влечет снижение значений трудового потенциала агентов-его жителей. Таким образом, представленная конструкция модели позволяет имитировать не только влияние деятельности людей на экономику и экологию региона, но и ответное влияние условий существования людей на их здоровье и работоспособность.

Разрабатываемый блок предназначен для проведения сценарных прогнозов развития экологической обстановки в регионе при различных предположениях о динамике основных факторов, влияющих на уровни загрязнения воздушной и водной сред. Управляемые параметры модели позволят апробировать различные стратегии в сфере управления охраной окружающей среды и проводить сравнение их эффективности.

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

Список литературы

1. Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В. Механизмы управления эколого-экономическими системами / Под ред. академика С.Н. Васильева. М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. 244 с.
2. Wolf S., Schütze F., Jaeger C.C. The Possibility of Green Growth in Climate Policy Analysis Models – a Survey // Global Climate Forum Working Paper 1/2016. http://www.globalclimateforum.org/fileadmin/ecf-documents/publications/GCF_Working_Papers/GCF_WorkingPaper1-2016.pdf.
3. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика, 2013. 295 с.
4. Handbook of Research on Agent-Based Societies: Social and Cultural Interactions / G. Trajkovski, S.G. Collins (Eds.). New York: Information Science Reference Hershey, 2009. 412 p.
5. Бурков В. Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: СИНТЕГ, 1999. 128 с.
6. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. Агент-ориентированная социо-эколого-экономическая модель региона // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. № 3. С. 2-11.
7. Методика «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия»: утверждена Минприроды России 30.11.1992.
8. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. Регулирование промышленных выбросов на основе агент-ориентированного подхода // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2017. № 6. С. 42-58.
9. Водные ресурсы и качество вод: состояние и проблемы управления / Под ред. В.И. Данилова-Данильяна, В.Г. Пряжинской. М.: РАСХН, 2010. 415 с.