

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

DOI: 10.15838/esc.2017.6.54.3

УДК 332.14; 502.33; 004.94, ББК 65.050; 20.18; 65с

© Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.

Регулирование промышленных выбросов на основе агент-ориентированного подхода*



**Валерий Леонидович
МАКАРОВ**

Центральный экономико-математический институт РАН
Москва, Российская Федерация, 117418, Нахимовский пр., д. 47
E-mail: makarov@cemi.rssi.ru



**Альберт Рауфович
БАХТИЗИН**

Центральный экономико-математический институт РАН
Москва, Российская Федерация, 117418, Нахимовский пр., д. 47
E-mail: albert.bakhtizin@gmail.com



**Елена Давидовна
СУШКО**

Центральный экономико-математический институт РАН
Москва, Российская Федерация, 117418, Нахимовский пр., д. 47
E-mail: sushko_e@mail.ru

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ в рамках научного проекта № 17-02-00416 «Методология построения региональных агент-ориентированных социо-эколого-экономических моделей».

Для цитирования: Макаров, В.Л. Регулирование промышленных выбросов на основе агент-ориентированного подхода / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2017. – Т. 10. – № 6. – С. 42–58. DOI: 10.15838/esc/2017.6.54.3

For citation: Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. Regulation of industrial emissions based on the agent-based approach. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2017, vol. 10, no. 6, pp. 42–58. DOI: 10.15838/esc/2017.6.54.3

Аннотация. В статье показан один из наиболее передовых методов регулирования промышленных выбросов, применяемый правительствами разных стран, – система торговли квотами на выбросы, основанная на бабл-принципе. Метод является инструментом стимулирующего регулирования, побуждающим предприятия к снижению нагрузки на окружающую среду, задавая им ограничения на объемы выбросов вредных веществ, но при этом предоставляя им определенную свободу в выборе способов достижения заданных нормативов выбросов. Для создания отечественной комплексной системы регулирования выбросов полезным было бы использование инструментов предварительной оценки эффектов от реализации различных мер регулирования. Одним из таких инструментов может стать разработанная авторами и представленная в статье агент-ориентированная региональная модель, использование которой позволит в ходе компьютерных экспериментов апробировать различные сочетания управляющих воздействий – как административных, так и рыночных – для поиска их сбалансированного сочетания. В модели имитируется производственная деятельность агентов-предприятий, на которых работают агенты-люди. Предприятия, кроме продукции, производят также выбросы, укладываясь в установленные для них ограничения или же превышая их и выплачивая за это превышение штрафы. Предприятия также 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, 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. Основным отличием представленной АОМ от других моделей этого класса, известных из литературы, является введение в функцию полезности предприятий горизонта планирования, что позволяет предприятиям выстраивать свою стратегию снижения выбросов, рассчитанную на несколько лет вперед.

Ключевые слова: агент-ориентированная модель, загрязнение воздуха, рыночный инструмент, бабл-принцип, торговля выбросами, стимулирующее регулирование.

Тема снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду вообще и уменьшения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в частности сохраняет свою актуальность на протяжении последних десятилетий. Большим шагом к решению этой проблемы в масштабе всей планеты стало принятие в 1997 году Киотского протокола – международного соглашения, обязывающего развитые страны и страны с переходной экономикой сократить или стабилизировать выбросы парниковых газов. В рамках Киотского протокола Россия брала на себя обязательства по стабилизации объемов среднегодовых выбросов на уровне 1990 года, которые сумела перевыполнить, сократив за 20 лет объем выбросов от энергетического сектора на 37%. В связи с выполнением своих международных обязательств наша страна в настоящее время не планирует участвовать в мероприятиях по выполнению этого протокола. Однако внутри страны задача по снижению объема

выбросов сохраняет свою актуальность, так как 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 необходимо использовать все возможные административные и экономические меры воздействия на предприятия, служащие источниками загрязнения, особенно такие меры, которые не только обоснованы с точки зрения экономической теории, но и доказали свою эффективность на практике.

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

В работах [3; 22] представлен анализ различных механизмов управления эколого-экономическими системами, включая оптимизационные, теоретико-игровые и имитационные модели. В работе [3] детально рассмотрен широкий спектр мер от внедрения систем мониторинга, систем компенсации затрат на снижение уровня риска и применения штрафов до систем экономической мотивации предприятий в улучшении экологического поведения, таких, например, как продажа квот на выбросы. Следует подчеркнуть, что и Киотский протокол также предусматривает применение так называемых механизмов гибкости, включая торговлю квотами, при которой государства или отдельные хозяйствующие субъекты на его территории могут продавать или покупать квоты на выбросы парниковых газов на национальном, региональном или международном рынках.

Основой механизма торговли квотами на выбросы служит так называемый «бабл-принцип» (от английского bubble – пузырь), заключающийся в том, чтобы поддерживать заданный уровень загрязнения в регионе, разрешая тем предприятиям региона («пузыря»), которым удалось снизить суммарный выброс загрязняющего вещества ниже установленного им уровня, продавать излишки сокращения выбросов тем предприятиям данного региона, которые свою квоту превысили. Это действительно механизм гибкости, так как позволяет предприятиям выбирать наиболее целесообразную экономическую стратегию достижения заданных экологических нормативов. Предприятиям предоставляется выбор платить штрафы, покупать/продавать квоты на выбросы, устанавливать системы очистки или модернизировать само производство и т.д., сохраняя при этом суммарную экологическую нагрузку в пределах региона. Для реализации механизма торговли квотами на выбросы создаются соответствующие банки квот.

Важно отметить, что представленный механизм торговли квотами на выбросы достаточно эффективен с точки зрения общества в целом, так как позволяет добиться поставленной природоохранной задачи с наименьшими затратами.

Указанные достоинства механизма бабл-принципа сделали его настолько привлекательным, что предпринимаются попытки его адаптации для применения, например, при регулировании сбросов загрязняющих веществ в составе сточных вод в водные объекты (см., например, [8]).

В настоящее время в разных странах мира накоплен большой практический опыт внедрения рыночных систем регулирования региональных атмосферных загрязнений. Показателен в этом смысле опыт США, на анализе которого стоит остановиться подробнее.

США. Программа по торговле разрешениями на выбросы двуокиси серы (SO₂)

Программа по торговле разрешениями на выбросы двуокиси серы (SO₂), развернутая в США в соответствии с разделом IV поправок к Закону о чистом воздухе 1990 года (U.S. Clean Air Act Amendments (CAAA)²), была первой в мире крупномасштабной системой ограничения и торговли выбросами загрязняющих веществ. Заявленная цель Программы «Кислотный дождь» (Acid Rain Program (ARP))³ заключалась в сокращении общих ежегодных выбросов SO₂ в США на десять миллионов тонн по сравнению с 1980 годом, когда общий объем выбросов в США составлял около 26 млн. тонн. В отличие от обычного природоохранного законодательства, в законе не предусматривалось, каким именно способом электростанции уменьшат выбросы SO₂. Вместо этого на первом этапе реализации Программы с 1995 по 2000 год были введены ограничения на совокупные выбросы SO₂ на 3200 угольных заводах страны и был создан рынок выпущенных правительством разрешений на выброс SO₂, на котором фирмы могли покупать и продавать эти разрешения. В результате к 2007 году суммарные годовые выбросы хотя и снизились несколько ниже заявленных целевых значений Программы (произошло сокращение на девять миллионов тонн или на 43% по сравнению с уровнями

² U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). 1990 Clean Air Act Amendment Summary. – 2017. – URL: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/1990-clean-air-act-amendment-summary>.

³ U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). Acid Rain Program. – 2017. – URL: <https://www.epa.gov/airmarkets/acid-rain-program>.

1990 года), но при этом выработка электроэнергии на угольных электростанциях увеличилась с 1990 по 2007 год более чем на 26%⁴.

Что касается фактических расходов на соблюдение Программы «Кислотный дождь», то они хотя и превысили идеальный с точки зрения экономической эффективности уровень, но все же оказались значительно ниже оценок, заявленных правительственными аналитиками в ходе обсуждений, предшествовавших запуску этой Программы. Одной из причин такого результата, возможно, явилась недооценка этими аналитиками влияния высокой цены, установленной на выбросы SO₂. Высокая цена на выбросы послужила стимулом для внедрения в отрасли технологических инноваций как в системах очистки выбросов в атмосферу, так и в эксплуатации электростанций, что и сократило затраты за период [9; 19; 21].

На рисунках 1, 2 на карте-схеме США кругами показан объем выбросов SO₂ (SO₂ Emissions) на территории каждого штата по состоянию в 1990 и в 2015 годах (радиус круга зависит от объема выбросов в тысячах тонн (thousand tons)). Зеленым фоном выделены штаты, участвовавшие в программах регулирования загрязнения воздуха «Кислотный дождь» (ARP) и «Межгосударственное регулирование загрязнения воздуха» (Cross-State Air Pollution Rule (CSAPR)), контролировавших выбросы мелких частиц (controlled for fine particles). Кроме того, там же справа помещена диаграмма, показывающая динамику этого показателя за весь период для выбранного штата Огайо (Ohio), на территории которого объем выбросов был в начале периода максимальным, а снижение самое впечатляющее – на 92% (с 2211,6 тыс. тонн в 1990 году до 177,3 в 2015).

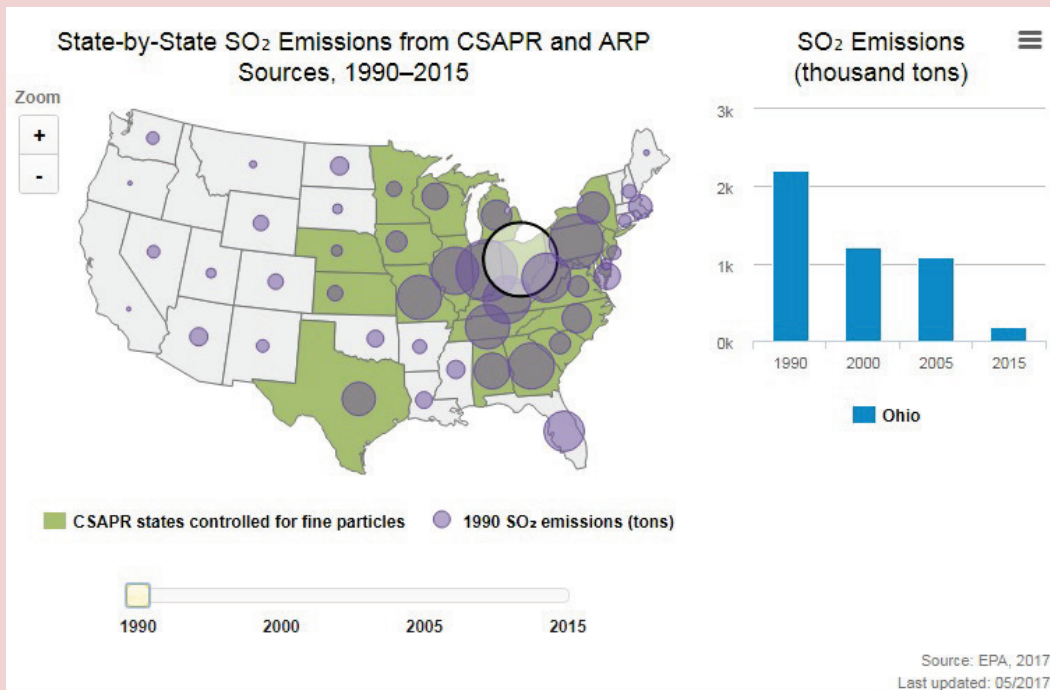
Подробнее об опыте внедрения рыночных систем регулирования региональных атмосферных загрязнений в разных странах мира можно прочесть в [1; 10; 11; 18]. Анализ результатов, полученных практически, свидетельствует о действенности и эффективности подобных систем, а значит, и о целесообразности внедрения аналогичной системы регулирования в Рос-

сии. Очевидно, что при разработке комплекса мер регулирования атмосферных выбросов в России необходимо использовать лучшие зарубежные наработки и при этом учесть местные особенности, как технологические, так и институциональные. Неоценимую помощь в создании отечественной комплексной системы регулирования выбросов могло бы оказать использование инструментов предварительной оценки эффектов от реализации различных мер регулирования. Особое внимание в этой связи следует обратить на методы имитационного моделирования, так как именно такой подход позволяет в ходе компьютерных экспериментов апробировать различные сочетания управляющих воздействий – как административных, так и рыночных – для поиска их сбалансированного сочетания.

Среди современных подходов к имитации больших социально-экономических систем наиболее адекватным следует признать агент-ориентированный подход [5; 7; 15]. Большая (или активная) система в данном случае понимается в терминологии В.Н. Буркова [2] 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. Следует подчеркнуть, что в агент-ориентированной модели (АОМ) можно создавать сколь угодно большое число агентов, наделенных индивидуальными характеристиками, значимыми в смысле их участия в экономической жизни, причем значения этих характеристик у разных агентов могут различаться. 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.

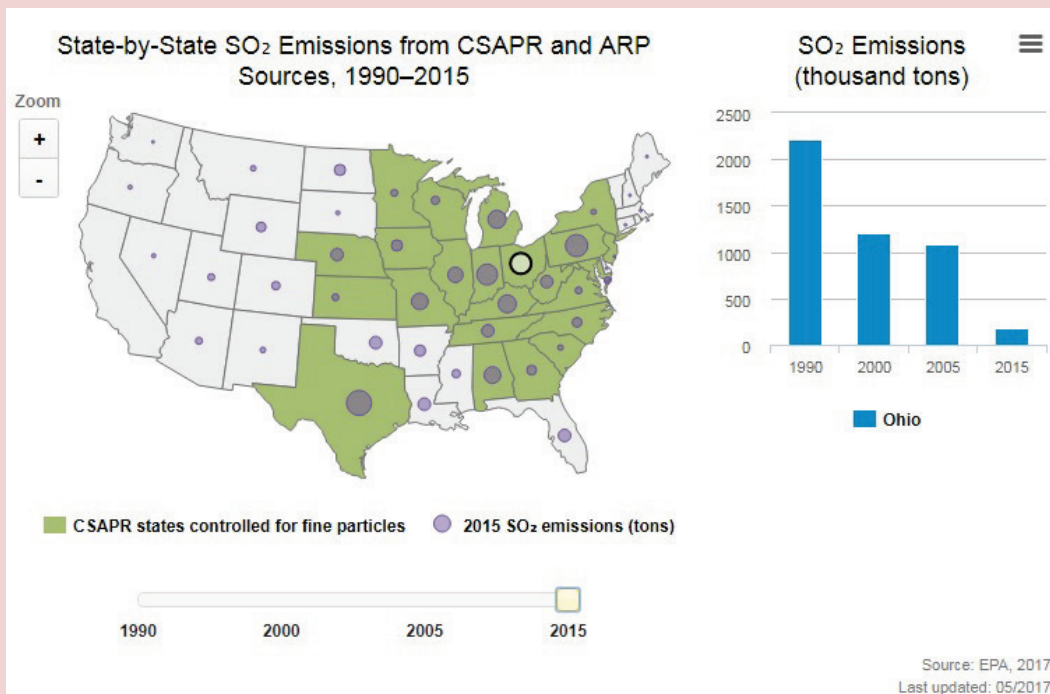
⁴ U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). Air Markets Program Data. – 2012. – URL: <https://ampd.epa.gov/ampd/>; U.S. EIA (Energy Information Administration). Annual Energy Review. – 2012. – URL: <https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/showtext.php?t=ptb0802a>.

Рис. 1. Карта распределения объемов выбросов SO₂ по штатам США, данные 1990 года



Источник: U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). Emission reductions. – 2017. – URL: https://www3.epa.gov/airmarkets/progress/reports/emissions_reductions_so2.html#figure2.

Рис. 2. Карта распределения объемов выбросов SO₂ по штатам США, данные 2015 года



Источник: U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). Emission reductions. – 2017. – URL: https://www3.epa.gov/airmarkets/progress/reports/emissions_reductions_so2.html#figure2.

Краткий обзор эколого-экономических АОМ

В литературе широко представлены АОМ, в которых имитируются процессы, связанные с возделыванием земли, рыбной ловлей и другими видами человеческой деятельности, непосредственно использующими природные ресурсы и влияющими на экологию мест проживания людей за счет избыточной эксплуатации этих ресурсов. Зачастую такая деятельность может грозить истощением природных ресурсов и экологической катастрофой местного масштаба.

В книге [13] агент-ориентированным моделям, разработанным для имитации и анализа различных процессов, связанных с природопользованием в различных странах Азии, посвящена отдельная глава. Представленные модели позволяют анализировать взаимное влияние социальных процессов и динамики экологических параметров территорий и предназначены для поиска рациональных компромиссов между интересами занятых различными видами деятельности людей для предотвращения деградации земель и для сбалансированного использования возобновляемых ресурсов.

Примерами исследований, способствующих решению задач подобного рода, являются также две АОМ, разработанные для постановки компьютерных экспериментов и выработки рекомендаций для выбора более эффективного с точки зрения использования природных ресурсов способа финансовой поддержки сельского населения и инвестирования в развитие сельскохозяйственных территорий. Исследования касались изучения специфики трудовой организации жизни сельского населения небольших азиатских стран – Непала и Таиланда, зависящих от климатических условий региона (сезонов дождей) и слабой развитости инженерной инфраструктуры. Первая модель, представленная в работе [14], воспроизводит комплекс взаимосвязей объектов социо-эколого-экономической системы Непала. Ключевыми особенностями модели являются: а) имитация миграции населения, вызванной низким уровнем жизни; б) использование конструкции социального капитала, в которой учитываются человеческие взаимоотношения, нормы поведения и т.п., облегчающие коллективную деятельность; и в) воссоздание особенностей системы хранения воды, реконструкция которой

способна повысить урожайность в засушливый период года и тем самым уровень жизни сельского населения.

В ходе экспериментов авторам модели удалось получить прогнозные результаты на десять лет по каждой деревне и по каждому варианту инвестирования с учётом различных климатических сценариев, что может помочь сформировать наилучшую стратегию развития этих деревень.

Вторая модель, представленная в работе [20], также предназначена для использования при разработке Программы инвестирования средств, выделяемых правительством страны (в данном случае Таиланда) для строительства водопроводной и водосборной инфраструктуры. Важным требованием к Программе является ее сбалансированность с учётом специфики трудовой занятости селян. Модель апробирована в ходе экспериментов, получены предварительные результаты.

Можно упомянуть также АОМ, представленную в работе российских авторов [4]. Это – концептуальная модель мультиагентной системы управления экологической безопасностью, в которой элементами эколого-экономической системы являются агенты достаточно сложной конструкции (интеллектуальные агенты), способные к кооперации при выработке механизмов управления и к координации действий на различных уровнях иерархии, начиная с агентов-предприятий и заканчивая агентом-супервизором, представляющим органы власти. В полномочия агента-супервизора входит изменение таких правил игры для агентов-предприятий, как ограничения на выбросы загрязняющих веществ и штрафные санкции за превышение допустимых уровней выбросов. Решения агентов-предприятий заключаются в выборе стратегии инвестиций в природоохранные мероприятия – распределенной во времени последовательности этих инвестиций, обеспечивающей достижение установленных экологических норм к определенному моменту времени. Данные об апробации этой модели в работе, к сожалению, не приводятся.

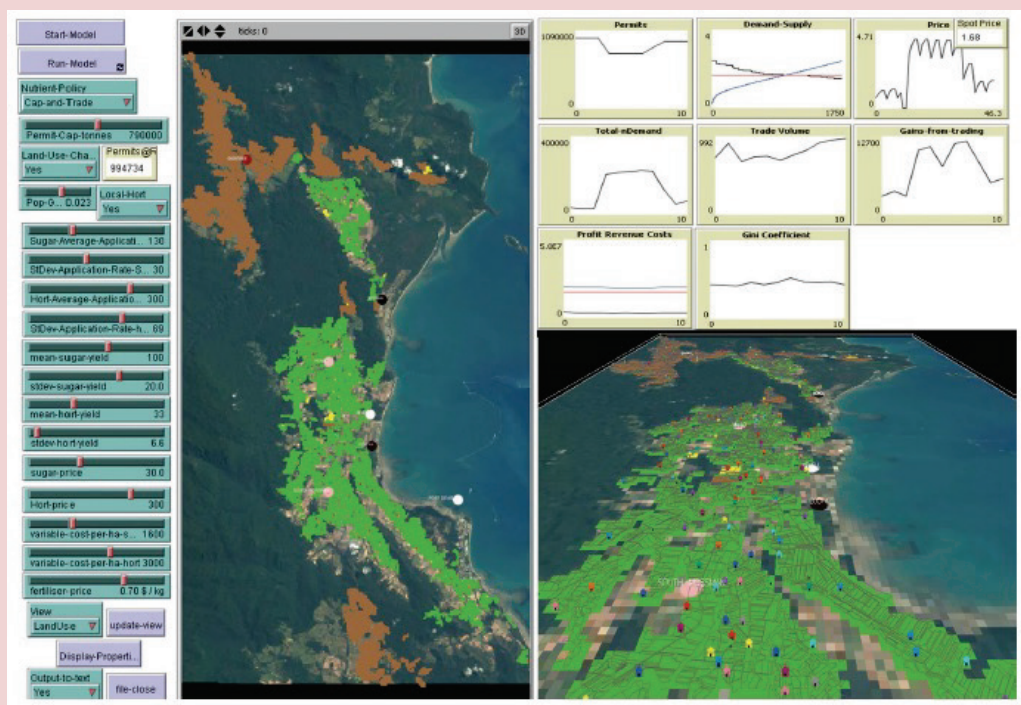
В литературе, хотя и в значительно меньшем количестве, представлены также АОМ, посвященные интересующей нас теме торговли квотами на выбросы загрязняющих веществ. Упомянем здесь две модели этого типа.

Первая АОМ, представленная в работах [16; 17], предназначена для анализа влияния различных мер регулирования и торговли квотами на сбросы в водную среду и на качество воды вдоль береговой линии Австралии. Сброс загрязняющих веществ в воду создает проблемы для поддержания здоровой морской экосистемы, что в свою очередь негативно влияет на условия землепользования. Агенты в модели занимаются садоводством или выращиванием сахарного тростника, и возделывание этих культур по-разному влияет на экологию. Интерфейс модели на каждом шаге имитации наглядно демонстрирует на карте текущее состояние всей моделируемой экосистемы, а также позволяет пользователю в ходе компьютерных экспериментов варьировать множество параметров (таких как урожайность культур, цены и т.д., всего свыше 15 параметров) для оценки последствий реализации различных сценариев. На *рисунке 3* показан интерактивный интерфейс модели, включающий пространственную карту с границами выделенных участков и

расположенными на них домами. Вверху слева находится кнопка запуска модели. Кроме того, слева находятся управляющие элементы – «бегунки» и переключатели, каждый из которых связан с одним из параметров. С помощью переключателя пользователь может выбрать одно из заданных значений параметра (например, включить или отключить режим торговли выбросами), а двигая «бегунок», пользователь может увеличивать/уменьшать значения соответствующих параметров модели. Справа в верхней части интерфейса представлены графические материалы, показывающие динамику результатов моделирования в течение периода симуляции (квоты, цены, кривые спроса и предложения, объем торгов и т.д., всего 8 графиков).

В работе [12] представлена АОМ, моделирующая поведение предприятий электроэнергетики и влияние на это поведение политики торговли выбросами CO₂, которая в Европе является одним из основных инструментов достижения согласованных целей сокращения

Рис. 3. Интерактивный интерфейс модели

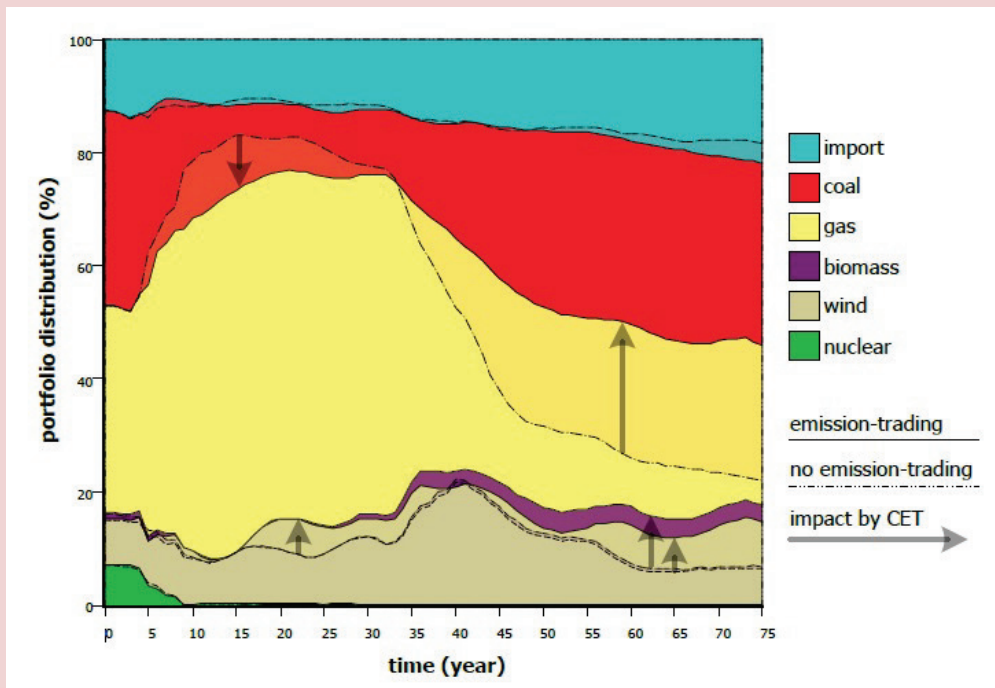


Источник: Heckbert S. Agent-based modelling of emissions trading for coastal landscapes in transition // Journal of Land Use Science. – 2011. – Vol. 6. – No. 2–3. – P. 140.

этих выбросов (в Европе на производство электроэнергии приходится одна треть выбросов CO_2). Соответствующая Программа реализуется с 2005 года. Агенты-предприятия в модели могут покупать/продавать квоты на выбросы, а могут и инвестировать в изменение технологии производства, переводя его на использование других энергоносителей с низким уровнем CO_2 . Проведенные эксперименты свидетельствуют о наличии определенного влияния политики властей на изменение структуры используемых предприятиями энергоносителей – наблюдался долгосрочный сдвиг этой структуры в сторону более интенсивного производства энергии с низким уровнем CO_2 . Однако это влияние относительно невелико и проявляется с большим запаздыванием. В большинстве сценариев абсолютные выбросы от выработки электроэнергии растут, что соответствует наблюдающейся на практике тенденции расширения текущей мощности за счет создания новых угольных электростанций. По-видимому, в

производстве электроэнергии экономический эффект от торговли выбросами CO_2 недостаточен для того, чтобы перевесить экономические стимулы для выбора угля. На рисунке 4 показана динамика структуры (portfolio distribution, %) используемых предприятиями Евросоюза энергоносителей при наличии торговли выбросами (emission-trading, обозначена сплошной линией) и без нее (no emission-trading, обозначена пунктирной линией), а серыми стрелками показаны изменения, вызванные проведением такой политики (impact by CET). Представлены следующие виды электростанций: атомные (nuclear), ветряные (wind), работающие на биомассе (biomass), на газе (gas), на угле (coal), а также показана доля импорта (import). На рисунке видно, что основными видами используемых энергоносителей являются газ и уголь, причем доля угля к концу прогнозного периода неуклонно растет и в том, и в другом варианте, хотя система торговли выбросами существенно замедляет этот рост.

Рис. 4. Динамика структуры используемых предприятиями ЕС энергоносителей и влияние на нее системы торговли выбросами CO_2



Источник: Chappin E.J.L., Dijkema G.P.J. On the Impact of CO_2 Emission-Trading on Power Generation Emissions // Technological Forecasting & Social Change. – 2009. – No. 76. – P. 367.

Проведенный анализ экономических методов регулирования в экологической сфере, а также опыта применения агент-ориентированного подхода к моделированию этих процессов стимулировал авторов к разработке собственной АОМ для апробации различных стратегий реализации бабл-принципа в управлении регионом. Таким образом, целью настоящего исследования была разработка региональной АОМ, воссоздающей внутреннюю структуру и правила функционирования региона как сложной социо-эколого-экономической системы, включающей самостоятельно действующих крупных экономических акторов – предприятия и имитирующей реакцию этих акторов на меры регулирования выбросов. Предназначение такой АОМ – служить инструментом предварительной оценки эффектов от реализации различных мер регулирования.

Модель управления экологическим поведением агентов-предприятий

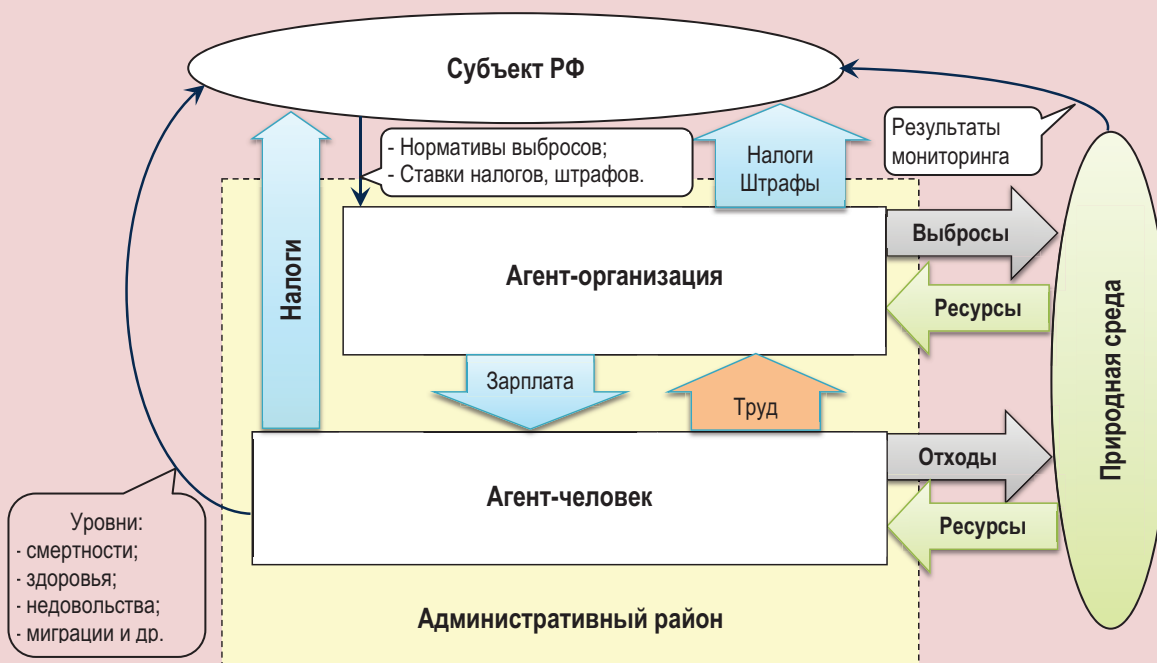
Под экологическим поведением предприятий в статье подразумевается управление их объемами выбросов вредных веществ, обра-

зующихся в процессе производства. Концептуальной основой разрабатываемой в ЦЭМИ РАН агент-ориентированной модели управления экологическим поведением предприятий послужили следующие положения:

- Имитируемая в модели система управления экологическим поведением предприятий должна быть комплексной и включать как административные, так и экономические меры воздействия на агентов-предприятия.
- Система должна стимулировать предприятия к снижению суммарных по региону выбросов.
- Система должна быть достаточно гибкой, чтобы предоставлять предприятиям выбор стратегий поведения при соблюдении нормативов экологического состояния региона в целом.
- С точки зрения управляющего центра (в роли которого здесь выступает пользователь АОМ) она должна быть достаточно прозрачной и эффективной.

Всем этим требованиям удовлетворяет описанный выше механизм бабл-принципа, апробированный на практике и показавший свою эффективность.

Рис. 5. Схема взаимного влияния агентов и их окружения в агент-ориентированной модели региона



Источник: 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.

Технологической основой разрабатываемой агент-ориентированной модели управления экологическим поведением предприятий послужила конструкция региональной социо-эколого-экономической АОМ, представленная в статье [6]. На *рисунке 5* показана обобщенная схема взаимного влияния агентов и их окружения в данной региональной АОМ, где широкими стрелками показаны направления перемещения ресурсов, а тонкими – направления информационных потоков.

В статье основное внимание было уделено созданию механизмов, обеспечивающих имитацию в АОМ влияния на экологию региона деятельности людей – его жителей и предприятий, расположенных его территории, а также ответное влияние состояния экологии региона на здоровье и настроения его жителей.

В настоящей работе, развивающей указанную социо-эколого-экономическую модель, основное внимание направлено на обеспечение реалистичной имитации в рамках АОМ различных стратегий экологического поведения агентов-предприятий, связанного с их участием в системе торговли выбросами. Для достижения этой цели не только была разработана достаточно сложная конструкция агента-предприятия, но и соответственно усложнена окружающая агентов среда. В итоге модель включает формальные конструкции («классы» в терминологии современного объектно-ориентированного программирования), соответствующие участвующим в процессе торговли выбросами субъектам (агентам) и объектам внешней среды. При этом классы субъектов-агентов отличаются от классов объектов тем, что кроме характеристик сущностей реального мира, значимых для поставленной в модели задачи, они включают также и программные модули («методы»), реализующие процедуры имитации поведения агентов данного класса. При запуске модели создаются популяции агентов и множество объектов – экземпляров каждого класса АОМ с индивидуальными значениями заданных характеристик.

Система классов АОМ:

- **Класс агентов-предприятий**

а) характеристики:

- индекс предприятия;
- название;
- отраслевая принадлежность, вид деятельности (индекс);

- численность занятых;
- объем производства;
- административная принадлежность (индекс);
- объект – образ предприятия на географической карте региона;
- расположение на географической карте региона источника выбросов в атмосферу;
- горизонт планирования;
- технологический уровень (по шкале);
- удельные выбросы по основным видам газов;
- объемы выбросов по видам;
- квоты на выбросы по видам;
- список видов выбросов, по которым не выбраны квоты (K_v^+);
- список видов выбросов, по которым превышены квоты (K_v^-);
- размер штрафа за превышение выбросов по видам и суммарный;
- доход от продажи выбросов по видам и суммарный;
- расходы на установку улавливающих фильтров;
- расходы на модернизацию;
- список (коллекция) агентов-людей – работников предприятия;

б) мотивация: снизить суммарные издержки за весь период планирования, связанные с соблюдением региональных экологических требований.

в) виды действий, доступные агенту:

- продажа свободных квот на выбросы, если выбросы предприятия ниже установленной квоты;
- покупка недостающих квот на выбросы, если выбросы предприятия превышают установленные квоты;
- уплата штрафов за превышение допустимых квот на выбросы;
- установка фильтров, снижающих объем выбросов в атмосферу;
- модернизация производства до перехода на следующий технологический уровень для снижения объема выбросов.

г) методы (процедуры):

- процедура расчета суммарных затрат за весь период планирования для разных вариантов действий;
- процедура сравнения различных вариантов и выбора лучшего с наименьшими суммарными затратами.

- **Класс регионов**
- индивидуальный номер;
- название;
- географическая карта региона;
- точки мониторинга уровня загрязнения атмосферы на карте;
 - уровень загрязнения по видам выбросов;
 - цена квот на единицу выбросов по видам;
 - объем продаваемых квот на выбросы (банк выбросов) по видам;
 - поступления от штрафов за выбросы по видам;
 - понижающий коэффициент при разрешении на торговлю выбросами (α);
 - численность агентов-предприятий;
 - список (коллекция) агентов-предприятий.
- **Класс выбросов в атмосферу**
- индекс вида выбросов;
- название;
- допустимая концентрация;
- удельные затраты на установку фильтра;
- штраф за загрязнение;
- цена квоты на единицу выбросов.
- **Класс видов деятельности**
- индекс вида деятельности;
- название;
- число технологических уровней;
- производственная функция как зависимость объема выпуска от численности занятых по технологическим уровням;
 - финансовые затраты на перевод производства на следующий технологический уровень (по технологическим уровням);
 - затраты времени на перевод производства на следующий технологический уровень (по технологическим уровням);
 - минимальные и максимальные выбросы на единицу продукции по видам выбросов и технологическим уровням.

Общее управление работой модели осуществляет **главный класс**. Он обеспечивает ввод исходной информации; создание популяции агентов и экземпляров других классов модели заданной численности; установку стартового состояния системы, соответствующего базовому году имитации; отображение состояния популяции агентов и других обобщающих показателей АОМ на экране; организацию диалога с пользователем; организацию процесса

имитации на каждом шаге. Кроме того, каждый класс, содержащий коллекцию агентов, содержит также метод, обеспечивающий сбор статистики по этой коллекции для получения обобщающих показателей.

Класс агентов-людей в модели обеспечивает воспроизводство населения и его трудового потенциала, но не участвует в процессе торговли выбросами, поэтому мы не останавливаемся здесь на его описании – его конструкция совпадает с конструкцией агентов-людей из [6].

Рассмотрим теперь, как реализован в нашей региональной АОМ процесс торговли выбросами в соответствии с бабл-принципом. Общая схема алгоритма поведения агента-предприятия на каждом шаге имитации показана на *рисунке 6*. Данная процедура повторяется для каждого агента-предприятия из популяции агентов этого типа:

В1. Активизация выбранного агента-предприятия на текущем шаге имитации.

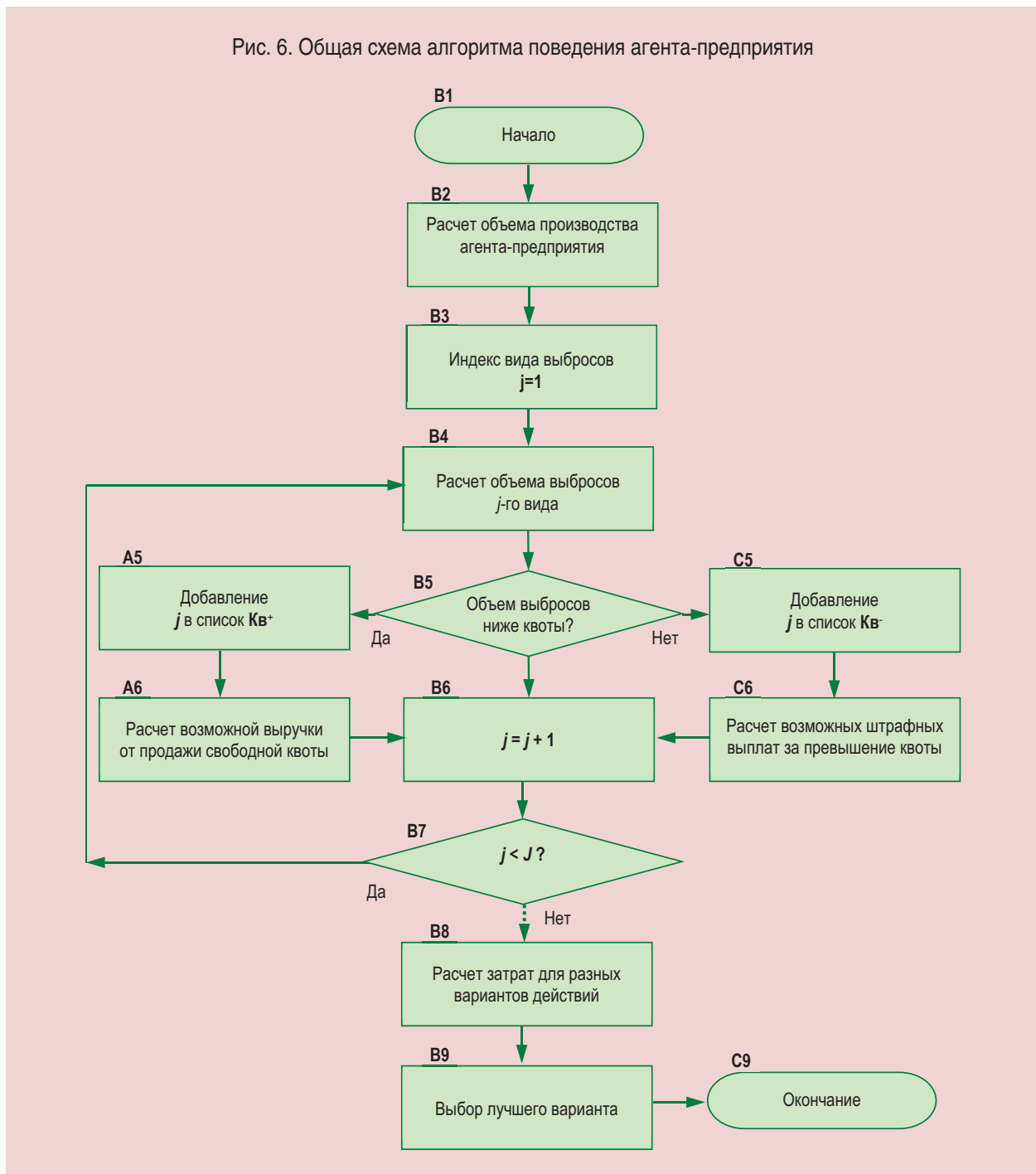
В2. В этом блоке с использованием производственной функции производится расчет объема производства агента-предприятия при текущих значениях численности агентов-работников и уровне технологического развития.

В3. Начало цикла, в котором последовательно рассматриваются каждый вид выбросов в атмосферу j ($j = [1, J]$, где J – число видов выбросов, связанное с технологией производства).

В4. Расчет объема выбросов j -го вида, соответствующего объему производства и удельным выбросам этого вида при текущем технологическом уровне предприятия.

В5. Блок сравнения полученного объема выбросов j -го вида с имеющейся у предприятия соответствующей квотой. Если объем выбросов ниже квоты, то происходит переход к блоку **А5**, а затем **А6**, в которых вид j добавляется в список **Кв⁺** и производится расчет выручки от продажи неиспользованной квоты. Если же объем выбросов превышает квоту, то происходит переход к блоку **С5**, а затем **С6**, в которых вид j добавляется в список **Кв⁻** и производится расчет штрафных выплат за превышение квоты. И в том, и в другом случае далее происходит переход к рассмотрению следующего вида выбросов (блок **В6**), а если все виды рассмотрены, то цикл заканчивается.

Рис. 6. Общая схема алгоритма поведения агента-предприятия



Действия агента-предприятия производятся в модели в два этапа. На первом этапе все агенты популяции определяют с объемами квот, которые они намерены продать или купить, что формирует банк квот на выбросы различных видов (на этом этапе выполняются все описанные выше блоки для каждого агента). После чего агенты приступают к анализу условий ре-

ализации различных доступных им стратегий поведения и выбора наилучшей (блоки В8 – В9).

На рисунке 6 переход от одного этапа поведения агента к другому подчеркнут пунктирной стрелкой между блоками В7 и В8.

В8. Расчет затрат для возможных вариантов действий агента. Расходы предприятий в модели складываются: а) из штрафов за превышение

квот на выбросы из списка K_b ; б) стоимости покупки недостающих квот на выбросы из того же списка; в) стоимости установки фильтров, улавливающих вредные примеси и снижающих объем соответствующих выбросов; г) стоимости проведения модернизации, позволяющей предприятию перейти на новый технологический уровень, при котором снижаются удельные выбросы.

Полностью или частично компенсировать эти расходы предприятие может за счет поступлений от продажи излишков квот на выбросы из списка K_b^+ , в том числе тех, которые появляются после установки фильтров или проведения модернизации производства.

Расчет затрат осуществляется за весь период, соответствующий горизонту планирования агента. Очевидно, что для рассмотрения такого варианта, как модернизация, горизонт планирования должен быть значительно больше, чем время осуществления этой модернизации, для того чтобы окупить затраты на нее.

Следует также отметить, что политика центра (в данном случае региона) направлена на снижение общего уровня загрязнения, поэтому и вводится понижающий коэффициент $0 < \alpha < 1$, на который умножается выставаемая на продажу квота на выбросы при поступлении в банк квот. Этот коэффициент может варьироваться для выбросов разных видов в зависимости от общего уровня загрязнения и политики региональных властей.

В9. Сравнение рассчитанных последствий реализации различных доступных агенту вариантов действий и выбор из них наилучшего, при котором минимизируются суммарные затраты на протяжении всего горизонта планирования. Важно отметить, что в АОМ последовательно имитируется поведение каждого агента-предприятия, причем очередность устанавливается случайным образом. В итоге выбор одних агентов, случайно оказавшихся в начале процесса, может сужать возможности выбора для оставшихся (например, если квоты уже распроданы).

В модели затем имитируется реализация выбранного агентом варианта. Так, например, если агентом принято решение о модернизации производства, то в течение срока реализации проекта по переводу производства на следующий технологический уровень агент продолжает платить штрафы (или покупать квоты, если это выгоднее), а по завершении этого срока изменяется его технологический уровень и одновременно меняются такие характеристики, как производственная функция и удельные выбросы различных видов. На следующих шагах имитации при расчетах используются уже новые значения этих характеристик.

С9. Завершение действий агента на шаге.

Очевидно, что суммарные затраты, а значит, и привлекательность для агента того или иного варианта действий зависят от уровня штрафов за превышения квот и значений коэффициента α для разных видов выбросов. Именно эти величины являются управляемыми параметрами модели, варьируя которые в ходе компьютерных экспериментов пользователь может апробировать различные варианты их соотношения для получения максимального эффекта от реализации механизма бабл-принципа.

Представленная конструкция АОМ была реализована в качестве самостоятельного блока большой социо-эколого-экономической модели и апробирована на условных данных об уровне штрафов, объемах выбросов, квотах на эти выбросы и стоимости модернизации производства. Эксперименты проводились для нескольких, также условных, предприятий региона одной отрасли, различающихся уровнем технологического развития. Все эти условия экспериментов оказывают существенное влияние на результат, поэтому, хотя модель и продемонстрировала адекватную реакцию на варьирование ее параметров, но пока эти результаты носят предварительный характер. После адаптации модели к условиям конкретного региона она может быть использована на уровне региональных органов власти.

Литература

1. Аверченков, А.А. Регулирование выбросов парниковых газов как фактор повышения конкурентоспособности России [Текст] / А.А. Аверченков, А.Ю. Галенович, Г.В. Сафонов, Ю.Н. Федоров. – Москва: НОПППУ, 2013. – 88 с.

2. Бурков, В. Н. Теория активных систем: состояние и перспективы [Текст] / В. Н. Бурков, Д.А. Новиков. – М.: СИНТЕГ, 1999. – 128 с.
3. Бурков, В.Н. Механизмы управления эколого-экономическими системами [Текст] / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, А.В. Щепкин; под ред. академика С.Н. Васильева. – М. : Издательство физико-математической литературы, 2008. – 244 с.
4. Еременко, Ю.И. Модель адаптивного поведения агентов мультиагентной системы управления экологической безопасностью [Текст] / Ю.И. Еременко, Е.Г. Доронина // Прикладная информатика. – 2010. – № 2 (26). – С. 71–82.
5. Макаров, В.Л. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели) [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин. – М.: Экономика, 2013. – 295 с.
6. Макаров, В.Л. Агент-ориентированная социо-эколого-экономическая модель региона [Текст] / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2015. – № 3. – С. 2–11.
7. Тарасов, В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика [Текст] / В.Б. Тарасов. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
8. Трейман, М.Г. Применение «бэбл-принципа» для водных объектов на примере акватории реки Нева [Электронный ресурс] / М.Г. Трейман, А.П. Юдин // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2014. – № 2. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-babl-printsipa-dlya-vodnyh-obektov-na-primere-akvatorii-reki-neva>.
9. Burtraw, D. Innovation Under the Tradable Sulfur Dioxide Emission Permits Program in the US Electricity Sector [Text] / Discussion Paper 00-38. Washington, D.C.: Resources for the Future. – 2000 – P. 28. – URL: <http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-DP-00-38.pdf>.
10. Burtraw, D. U.S. Emissions Trading Markets for SO₂ and NO_x [Text] / D. Burtraw, S. J. Szambelan. Discussion Paper 09-40. Washington, D.C.: Resources for the Future. – 2009 – P. 42. – URL: <http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-DP-09-40.pdf>.
11. Chan, G. The SO₂ allowance-trading system and the Clean Air Act Amendments of 1990: Reflections on 20 years of policy innovation [Text] / G. Chan, R. Stowe, R. Sweeney, R. Stavins // National Tax Journal. – 2012. – Vol. 65. – Pp. 419–452.
12. Chappin, E.J.L. On the Impact of CO₂ Emission-Trading on Power Generation Emissions [Text] / E.J.L. Chappin, G.P.J. Dijkema // Technological Forecasting & Social Change. – 2009. – No. 76. – Pp. 358-370.
13. Companion Modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia [Text] / F. Bousquet, G. Trébuil, B. Hardy (eds.). – Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, 2005. – P. 360.
14. Demonstrating Complexity with a Role-playing Simulation: Investing in Water in the Indrawati Subbasin, Nepal [Text] / Janmaat J., Lapp S., Wannop T., Bharati L., Sugden F. // International Water Management Institute, Sri Lanka. – 2015. – Research Report 163. [Electronic resource]. URL: http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub163/rr163.pdf.
15. Handbook of Research on Agent-Based Societies: Social and Cultural Interactions [Text] / G. Trajkovski, S.G. Collins (eds.). – New York: Information Science Reference Hershey, 2009. – P. 412.
16. Heckbert, S. Agent-Based Modeling in Ecological Economics [Text] / S. Heckbert, T. Baynes, A. Reeson // Annals of the New York Academy of Sciences, Ecological Economics Reviews. – 2010. – Vol. 1185. – Pp. 39–53.
17. Heckbert, S. Agent-based modelling of emissions trading for coastal landscapes in transition [Text] // Journal of Land Use Science. – 2011. – Vol. 6. – No. 2–3. – Pp. 137–150. – DOI: 10.1080/1747423X.2011.558599.
18. Heindl, P. Designing Emissions Trading in Practice. General Considerations and Experiences from the EU Emissions Trading Scheme (EU ETS) [Text] / P. Heindl, A. Löschel // The Centre for European Economic Research (ZEW), 2012. – Discussion Paper No. 12-009. – URL: <http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp12009.pdf>.
19. Lange, I. Technological change for sulfur dioxide scrubbers under market-based regulation [Text] / I. Lange, A. Bellas // Land Economics. – 2005. – No. 81(4). – Pp. 546–556.
20. Naivinit, W. Participatory agent-based modeling and simulation of rice production and labor migrations in Northeast Thailand [Text] / W. Naivinit, C. Le Page, G. Trébuil, N. Gajaseni // Environmental Modelling & Software. – 2010. – No 25(11). – Pp. 1345-1358. – DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.01.012.

21. Popp, D. Pollution control innovations and the Clean Air Act of 1990 [Text] // Journal of Policy Analysis and Management. – 2003. – No. 22 (4). – Pp. 641–660.
22. Wolf, S. The Possibility of Green Growth in Climate Policy Analysis Models – a Survey [Text] / S. Wolf, F. Schütze, C.C. Jaeger // Global Climate Forum Working Paper 1/2016. – URL: http://www.globalclimateforum.org/fileadmin/ecf-documents/publications/GCF_Working_Papers/GCF_WorkingPaper1-2016.pdf.

Сведения об авторах

Валерий Леонидович Макаров – академик РАН, доктор физико-математических наук, директор, Центральный экономико-математический институт РАН (117418, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский пр., д. 47; e-mail: makarov@cemi.rssi.ru)

Альберт Рауфович Бахтизин – член-корреспондент РАН, доктор экономических наук, заместитель директора, Центральный экономико-математический институт РАН (117418, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский пр., д. 47; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com)

Елена Давидовна Сушко – кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный экономико-математический институт РАН (117418, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский пр., д. 47; e-mail: sushko_e@mail.ru)

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D.

Regulation of Industrial Emissions Based on the Agent-Based Approach

Abstract. The article demonstrates one of the most advanced methods for regulation of industrial emissions, which is used by governments of different countries – an emissions trading system based on the bubble principle. This method is a tool for incentive-based control to encourage businesses to reduce the burden on the environment, providing emissions limits of harmful substances, but at the same time giving them some freedom to choose the methods to achieve the specified emission standards. To create a domestic comprehensive system for emissions regulation it would be useful to use the instruments for preliminary evaluation of effects from the implementation of various control measures. One of such instruments may be the agent-based regional model developed by the authors in the present paper. The model will help test different combinations of control measures – both administrative and market – with the use of computer experiments in order to find a balanced combination. The model simulates production activity of agent enterprises which employ agent people. Apart from products, enterprises also produce emissions keeping within the established limits or exceeding them and paying fees for emission excess. Businesses can also participate in emissions trading, that is, they can sell surplus emissions quotas to other companies or buy the necessary quota if it is cheaper than paying fees. In addition, enterprises can improve emission purification or modernize production achieving dramatic reduction in the content of harmful substances in emissions. The controllable model parameters the user can vary during experiments include the fees for exceeding the enterprises' quota for emission of various pollutants and requirements to reduce total regional emissions which are represented in the model by corresponding reduction factors. The main difference of the presented agent-based model from other models of this type covered in the literature is the introduction of the planning horizon in the enterprises' utility function which helps businesses build their strategy to reduce emissions, calculated for several years ahead.

Key words: agent-based model, air pollution, market-based instrument, bubble principle, emissions trading, incentive-based control.

References

1. Averchenkov A.A., Galenovich A.Yu., Safonov G.V., Fedorov Yu.N. *Regulirovanie vybrosov parnikovykh gazov kak faktor povysheniya konkurentosposobnosti Rossii* [Greenhouse gas emissions control as a factor in increasing Russia's competitiveness]. Moscow: NOPPPU, 2013. 88 p. (In Russian).
2. Burkov V.N., D.A. Novikov *Teoriya aktivnykh sistem: sostoyanie i perspektivy* [Theory of active systems: conditions and prospects]. Moscow: SINTEG, 1999. 128 p. (In Russian).
3. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. *Mekhanizmy upravleniya ekologo-ekonomicheskimi sistemami* [Mechanisms for controlling environmental economic systems]. Ed. by S.N. Vasil'ev. Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 2008. 244 p. (In Russian).
4. Eremenko Yu.I., Doronina E.G. Model' adaptivnogo povedeniya agentov mul'tiagentnoi sistemy upravleniya ekologicheskoi bezopasnost'yu [Model of agents' adaptive behavior in control system of ecological safety]. *Prikladnaya informatika* [Applied informatics], 2010, no. 2(26), pp. 71–82. (In Russian).
5. Makarov V.L., Bakhtizin A.R. *Sotsial'noe modelirovanie – novyi komp'yuternyi proryv (agent-orientirovannye modeli)* [Social modeling – a new technological breakthrough]. Moscow: Ekonomika, 2013. 295 p. (In Russian).
6. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. Agent-orientirovannaya sotsio-ekologo-ekonomicheskaya model' regiona [Agent-based socio-environmental economic model of a region]. *Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost'* [National interests: priorities and security], 2015, no. 3, pp. 2–11. (In Russian).
7. Tarasov V.B. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika* [From multi-agent systems to intellectual organizations: philosophy, psychology, information science]. Moscow: Editorial URSS, 2002. 352 p. (In Russian).
8. Treiman M.G., Yudin A.P. Primenenie “bubl-printcipa” dlya vodnykh ob’ektov na primere akvatorii reki Neva [The application of the “principle for the bubble” of water bodies in the river Neva]. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya “Ekonomika i ekologicheskii menedzhment”* [Scientific Journal of Saint Petersburg State University of Low Temperature and Food Technologies: Economics and Environmental Management], 2014, no. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-babl-printcipa-dlya-vodnyh-obektov-na-primere-akvatorii-reki-neva>. (In Russian).
9. Burtraw D. *Innovation Under the Tradable Sulfur Dioxide Emission Permits Program in the US Electricity Sector. Discussion Paper 00-38*. Washington, D.C.: Resources for the Future, 2000. P. 28. Available at: <http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-DP-00-38.pdf>.
10. Burtraw D., Szambelan S. J. U.S. *Emissions Trading Markets for SO2 and NOx. Discussion Paper 09-40*. Washington, D.C.: Resources for the Future, 2009. P. 42. Available at: <http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-DP-09-40.pdf>.
11. Chan G., Stowe R., Sweeney R., Stavins R. The SO2 allowance-trading system and the Clean Air Act Amendments of 1990: Reflections on 20 years of policy innovation. *National Tax Journal*, 2012, vol. 65, pp. 419–452.
12. Chappin E.J.L., Dijkema G.P.J. On the Impact of CO2 Emission-Trading on Power Generation Emissions. *Technological Forecasting & Social Change*, 2009, no. 76, pp. 358–370.
13. Bousquet F., Trébuil G., Hardy B. (Eds.). *Companion Modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia*. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, 2005. P. 360.
14. Janmaat J., Lapp S., Wannop T., Bharati L., Sugden F. Demonstrating Complexity with a Role-playing Simulation: Investing in Water in the Indrawati Subbasin, Nepal. International Water Management Institute, Sri Lanka, 2015. *Research Report 163*. Available at: http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub163/rr163.pdf.
15. Trajkovski G., Collins S.G. (Eds.). *Handbook of Research on Agent-Based Societies: Social and Cultural Interactions*. New York: Information Science Reference Hershey, 2009. P. 412.
16. Heckbert S., Baynes T., Reeson A. Agent-Based Modeling in Ecological Economics. *Annals of the New York Academy of Sciences, Ecological Economics Reviews*, 2010, vol. 1185, pp. 39–53.
17. Heckbert S. Agent-based modelling of emissions trading for coastal landscapes in transition. *Journal of Land Use Science*, 2011, vol. 6, no. 2–3, pp. 137–150.
18. Heindl P., Löschel A. Designing Emissions Trading in Practice. General Considerations and Experiences from the EU Emissions Trading Scheme (EU ETS). *The Centre for European Economic Research (ZEW), 2012. – Discussion Paper No. 12-009*. Available at: <http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp12009.pdf>.

19. Lange I., Bellas A. Technological change for sulfur dioxide scrubbers under market-based regulation. *Land Economics*, 2005, no 81(4), pp. 546–556.
20. Naivinit W., Page C. Le, Trébuil G., Gajasen N. Participatory agent-based modeling and simulation of rice production and labor migrations in Northeast Thailand. *Environmental Modelling & Software*, 2010, no 25(11), pp. 1345–1358.
21. Popp D. Pollution control innovations and the Clean Air Act of 1990. *Journal of Policy Analysis and Management*, 2003, no 22(4), pp. 641–660.
22. 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*. Available at: http://www.globalclimateforum.org/fileadmin/ecf-documents/publications/GCF_Working_Papers/GCF_WorkingPaper1-2016.pdf.

Information about the Authors

Valerii Leonidovich Makarov – Doctor of Physics and Mathematics, Director, Central Economic Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences (47, Nakhimovskii Avenue, Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: makarov@cemi.rssi.ru)

Al'bert Raufovich Bakhtizin – Doctor of Economics, RAS Corresponding Member, Deputy Director, Central Economic Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences (47, Nakhimovskii Avenue, Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com)

Elena Davidovna Sushko – Ph.D. in Economics, Leading Research Associate, Central Economic Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences (47, Nakhimovskii Avenue, Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: sushko_e@mail.ru)

Статья поступила 25.09.2017.