

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В МЕГАПОЛИСЕ

Е. В. Кислицын¹, В. В. Гоголин²

^{1,2} Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия

¹ kev@usue.ru, ² vlad.gogulin@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность работы обусловлена отсутствием серьезного математического и алгоритмического инструментария в работах, посвященных исследованию экологических систем. Поэтому в качестве основной цели данной статьи выступает конструирование имитационной модели экологической ситуации в крупном мегаполисе с использованием нотации системной динамики и идей агентного моделирования. *Материалы и методы.* Теоретическим и методологическим базисом исследования являются фундаментальные и современные труды в сфере экологии, математического и имитационного моделирования экологических систем. Используются методы анализа и синтеза, группировки, обобщения и классификации, а также математического анализа, моделирования и системной динамики. *Результаты.* На основе проведенного анализа существующих методик оценки экологической ситуации в городе были определены основные факторы, на нее влияющие: загрязнение от промышленных предприятий, от автотранспорта, наличие зеленых насаждений. Сконструирована имитационная модель, состоящая из шести структурных агентов и базового класса Main. Для проектирования и построения модели использована система AnyLogic 8.6. Три агента отражают факторы, влияющие на атмосферный воздух, один агент «Загрязнение» аккумулирует их влияние, и два агента отражают динамику развития города в целом. Имитационная модель имеет программную реализацию, адаптированную под город Екатеринбург. В ней разработан пользовательский интерфейс, позволяющий изменять экзогенные переменные в системе, представляющий динамику основных показателей в виде таблиц, графиков, столбиковых и круговых диаграмм, а также дающий возможность отразить загрязнение атмосферного воздуха в отдельных районах города. Разработанная имитационная модель позволила провести ряд модельных экспериментов, отражающих изменение экологической ситуации в городе в зависимости от принимаемых управленческих решений. *Выводы.* Сконструирована модель экологии города, отображающая ее как систему взаимосвязанных элементов. Созданная имитационная модель может подстраиваться индивидуально под любой крупный город, и с учетом адекватного ее наполнения отражать изменения атмосферного воздуха. Такая модель позволяет проводить простые имитационные эксперименты (анализ «что – если»), а также эксперимент варьирования параметров. В частности, проанализировано девять ситуаций и составлены предложения по совершенствованию системы мониторинга экологии в городе Екатеринбурге. Данное исследование может быть полезно органам государственного и муниципального управления в области экологии, специалистам в сфере математического и имитационного моделирования.

Ключевые слова: имитационная модель, системная динамика, агентное моделирование, экология, город, промышленность, загрязнение атмосферного воздуха

Для цитирования: Кислицын Е. В., Гоголин В. В. Имитационное моделирование экологической ситуации в мегаполисе // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 1. С. 92–106. doi:10.21685/2227-8486-2021-1-8

SIMULATION OF THE ENVIRONMENTAL SITUATION IN A MEGALOPOLIS

E.V. Kislitsyn¹, V.V. Gogulin²

^{1,2} Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

¹ kev@usue.ru, ² vlad.gogulin@bk.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the work is due to the lack of use of serious mathematical and algorithmic tools in works devoted to the study of ecological systems. Therefore, the main goal of this article is to construct a simulation model of the environmental situation in a large metropolis using system dynamics notation and agent modeling ideas. *Materials and methods.* The theoretical and methodological basis of the research is fundamental and modern works in the field of ecology, mathematical and simulation modeling of ecological systems. The article uses methods of analysis and synthesis, grouping, generalization and classification, as well as mathematical analysis, modeling and system dynamics. *Results.* Based on the analysis of existing methods for assessing the environmental situation in the city, the main factors affecting it were identified – pollution from industrial enterprises, from vehicles, and green spaces. A simulation model consisting of six structural agents and the Main base class is constructed. For the design and construction of the model, the AnyLogic 8.6 system is used. Three agents reflect the factors that affect the air, one agent "Pollution" accumulates their influence, and two agents reflect the dynamics of the city as a whole. The simulation model has a software implementation adapted for the city of Yekaterinburg. It has developed a user interface that allows you to change exogenous variables in the system, reflecting the dynamics of the main indicators in the form of tables, graphs, columns and pie charts, as well as reflect air pollution in individual districts of the city. The developed simulation model allowed us to conduct a number of model experiments that reflect changes in the environmental situation in the city, depending on the management decisions made. *Conclusions.* A simulation model of the city's ecology has been constructed, displaying it as a system of interrelated elements. The created simulation model can be adjusted individually for any large city, and, taking into account the adequate filling of the model, reflect changes in atmospheric air. This model allows you to conduct simple simulation experiments ("what – if" analysis), as well as an experiment of varying parameters. In particular, 9 situations were analyzed and proposals were made to improve the environmental monitoring system in the city of Yekaterinburg. This research can be useful for state and municipal authorities in the field of ecology, specialists in the field of mathematical and simulation modeling.

Keywords: simulation model, system dynamics, agent modeling, ecology, city, industry, air pollution

For citation: Kislitsyn E.V., Gogulin V.V. Simulation of the environmental situation in a megalopolis. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;1:92–106. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2021-1-8

Введение

Проблема загрязнения атмосферного воздуха в крупных городах сегодня волнует все слои народного хозяйства – домохозяйства, малые и крупные предприятия, государства. Принимаемые государственными и муниципальными органами решения в области экологии основываются прежде всего

на экспертных мнениях и оценках, прогнозах и тенденциях. В свою очередь исследователи в области экологии разрабатывают новые механизмы, позволяющие избавиться от вредных выбросов и увеличить эффективность используемых методов очищения атмосферного воздуха.

Тем не менее, являясь естественно-научной дисциплиной, экология должна использовать и междисциплинарные методы исследования. В частности, авторы предлагают использовать имитационное моделирование для оценки текущего состояния экологии и способов его улучшения. В данной статье сделана попытка спроектировать универсальную имитационную модель, которая способна отразить основные факторы загрязнения атмосферного воздуха в крупном городе и факторы, способствующие его очищению.

Цель исследования – разработать имитационную модель экологической ситуации в крупном городе, на примере города Екатеринбурга, и провести апробацию модели. Для достижения указанной цели авторами поставлены следующие научные задачи:

- 1) провести анализ существующих исследований в области моделирования экологических систем, выявить основные концепции и идеи, применяемые в них;
- 2) спроектировать имитационную модель экологии города Екатеринбурга, основанную на идеях системной динамики и агентного подхода, которая включает в себя основные факторы загрязнения и очищения атмосферного воздуха;
- 3) разработать спроектированную имитационную модель в программной среде, наполнить ее исходными данными по городу Екатеринбургу;
- 4) провести девять модельных экспериментов с имитационной моделью, интерпретировать результаты и предложить некоторые решения на основе полученных данных.

Объектом исследования является город Екатеринбург, а предметом – загрязнение атмосферного воздуха в городе. Исследование проведено в русле экосистемного подхода с использованием методов анализа и синтеза, группировки и обобщения, а также математического и имитационного моделирования в нотации системной динамики.

Материалы и методика

Особенностью предлагаемого подхода является использование методов системной динамики, впервые предложенных в работах Дж. Форрестера [1, 2] и Д. Медоуз [3, 4] и впоследствии развитых в работах А. С. Акопова [5], А. Борщева [6] и других исследователей. В основе динамических моделей макроэкономических систем лежат, как правило, дифференциальные уравнения первого порядка, которые можно переложить в нотацию системной динамики, используя потоковую стратификацию.

Чаще всего имитационные модели строятся для исследования сложных технических [7–9] либо социально-экономических систем [10–13]. В частности, авторы подтвердили успешность данного метода в исследованиях конкурентных рынков [14], финансовых систем [15], промышленных предприятий и отраслей [16] и др.

В основном, когда речь идет о моделировании экологических процессов и систем, в первую очередь в качестве объектов исследования выступают

отдельные популяции и их развитие. Например, исследование Г. С. Осипова посвящено простейшим моделям экологии, в частности классической модели «хищник – жертва» и четырем ее модификациям [17]. В качестве основы имитационных моделей здесь используется аппарат системной динамики, базирующийся на классических дифференциальных уравнениях. Изучению воспроизводства популяций посвящено и исследование А. Ю. Переварюхи, который использует исключительно математическое моделирование [18]. Еще одной популярной задачей является прогнозирование развития эпидемий, чему посвящена работа [19]. Здесь применяется нотация системной динамики с рядом модельных ограничений. Также ученые строят математические и имитационные модели в разрезе «промышленность – экономика – экология». Так, Д. В. Иванова построила двухконтурную имитационную модель управления энергосистемой Самарской области [20]. В данной модели исследованы механизмы повышения экономической и экологической эффективности функционирования промышленности.

Отдельный пул исследований посвящен имитационному моделированию городской среды, в том числе его экологическому аспекту. В работе [21] рассматривается влияние урбанизации на социально-экономические аспекты транспортной и туристической отраслей региона. Ш. Ш. Кахраманова осуществляет экологическое моделирование жилой среды по трем аспектам: математическое зонирование территории по комплексу геоэкологических условий, комплексное микроклиматическое районирование жилой среды и комплексное урбоэкологическое зонирование жилой среды [22].

Имеющиеся исследования городской среды с использованием методов имитационного моделирования являются узконаправленными и отражают отдельные аспекты функционирования города. Особо стоит отметить практическое отсутствие использования агентного подхода в экологических исследованиях. Тем не менее проблема загрязнения крупных мегаполисов с каждым годом растет по экспоненте и нужны новые механизмы и методы для анализа, мониторинга и совершенствования экологической ситуации. Поэтому в рамках нашего исследования используется синтез агентного моделирования и системной динамики для решения данной проблемы.

Результаты

Для конструирования имитационной модели в настоящем исследовании используется программная система AnyLogic 8.6, которая на сегодняшний день является единственной системой, поддерживающей одновременно три подхода к имитационному моделированию. Данное свойство необходимо в нашем исследовании, так как для проектирования имитационной модели применяется синтез системной динамики и агентного моделирования.

В качестве базиса разрабатываемой модели используется модель Дж. Форрестера [1], в частности агент «Население». Всего в имитационной модели спроектировано шесть агентов. В агенте «Население» реализованы накопитель, представляющий собой отражение численности населения города, а также четыре потока – рождаемость, смертность, иммиграция и эмиграция (рис. 1).

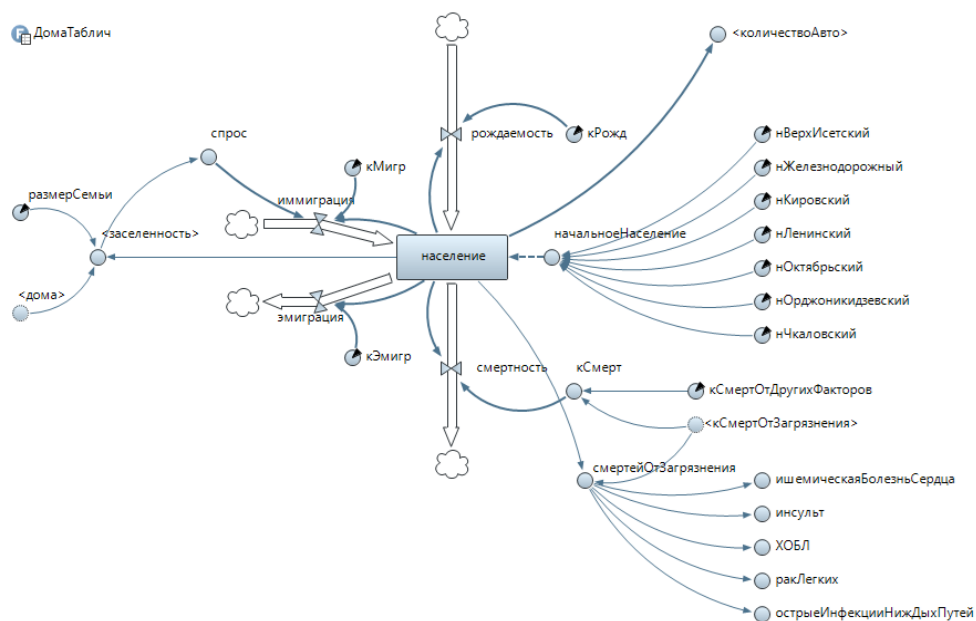


Рис. 1. Структура агента «Население»

Для более точного подсчета иммиграционного прироста населения был добавлен агент «Жилье» (рис. 2). С помощью данного агента рассчитывается количество домов, которое необходимо для подсчета заселенности города.

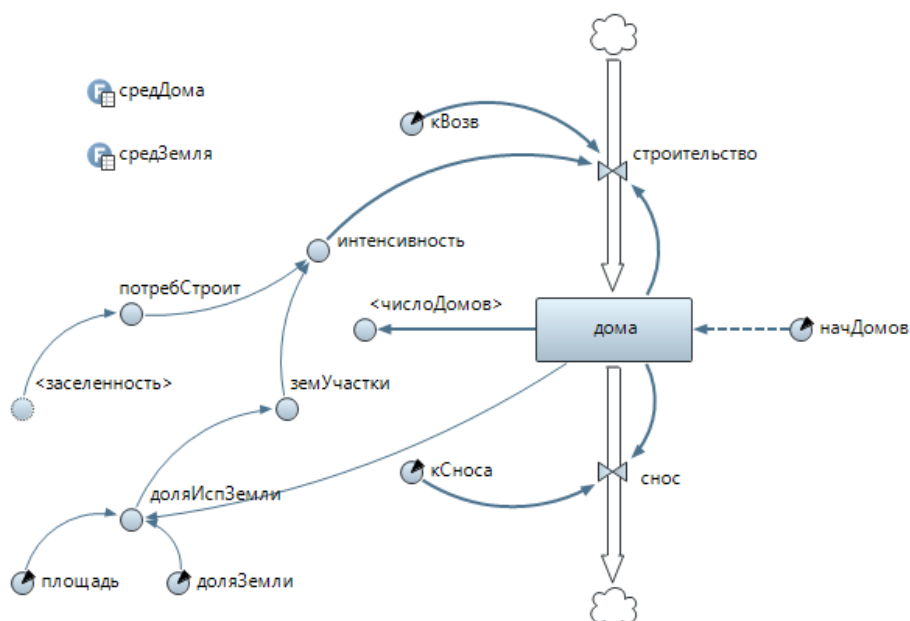


Рис. 2. Структура агента «Жилье»

Для описания факторов, от которых зависит состояние атмосферного воздуха, разработаны следующие агенты: «Автотранспорт», «Предприятия» и «Насаждения».

В агенте «Автотранспорт» рассчитывается количество выбросов автомобилей с учетом их экологического класса и используемого топлива (рис. 3).

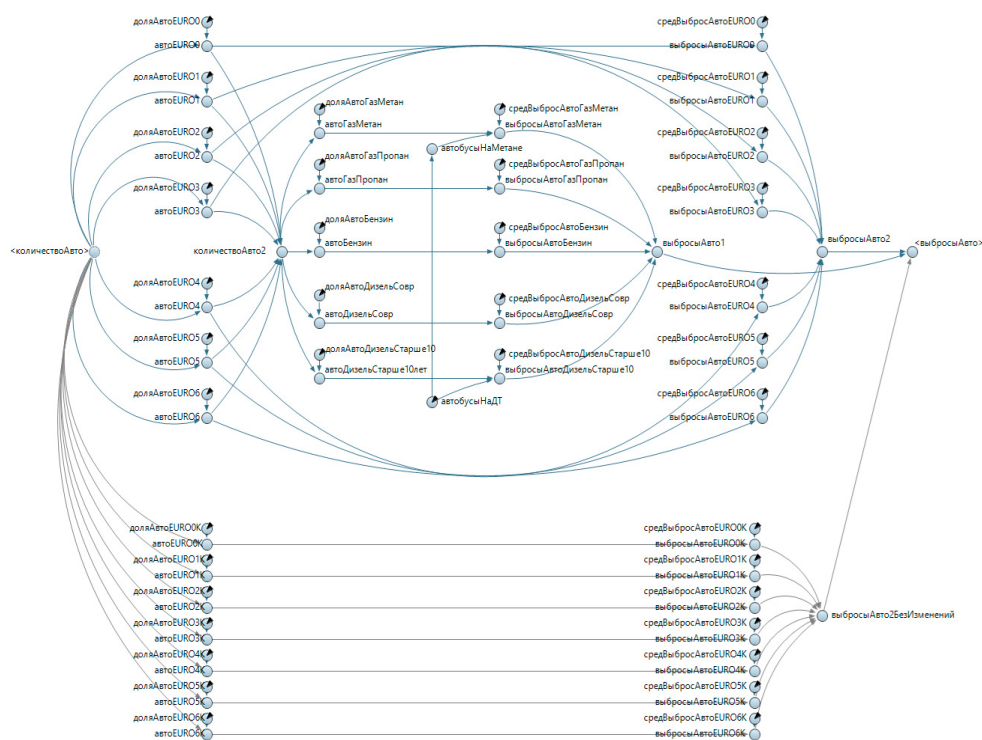


Рис. 3. Структура агента «Автотранспорт»

Для расчета количества вредных выбросов от транспортных средств, работающих на различном топливе, автотранспорт был поделен на пять категорий: автомобили, работающие на газовом оборудовании (метане или пропане), автомобили с бензиновыми двигателями, а также автотранспорт, работающий на дизельном топливе, причем отдельно были рассмотрены машины с дизельными двигателями старше 10 лет ввиду того, что они выбрасывают в атмосферу в среднем в два раза больше вредных веществ. Отдельно был учтен автотранспорт города с двигателями внутреннего сгорания: это автобусы, работающие на метане, в количестве 257 единиц и автобусы на дизельном топливе – 82 единицы (по данным сайта Администрации г. Екатеринбурга). Для более точных расчетов и проведения большего количества экспериментов с моделью автомобиля также были поделены на семь экологических классов от EURO0 до EURO6.

В агенте «Предприятия» содержится диаграмма потоков, учитывающая выбросы каждого крупного промышленного предприятия Екатеринбурга с помощью накопителей и уменьшение выбросов с помощью исходящих потоков, имитирующих внедрение новых технологий (рис. 4). Всего было учтено десять крупных промышленных предприятий и мест, выбрасывающих наибольшее количество тонн вредных веществ в атмосферу.

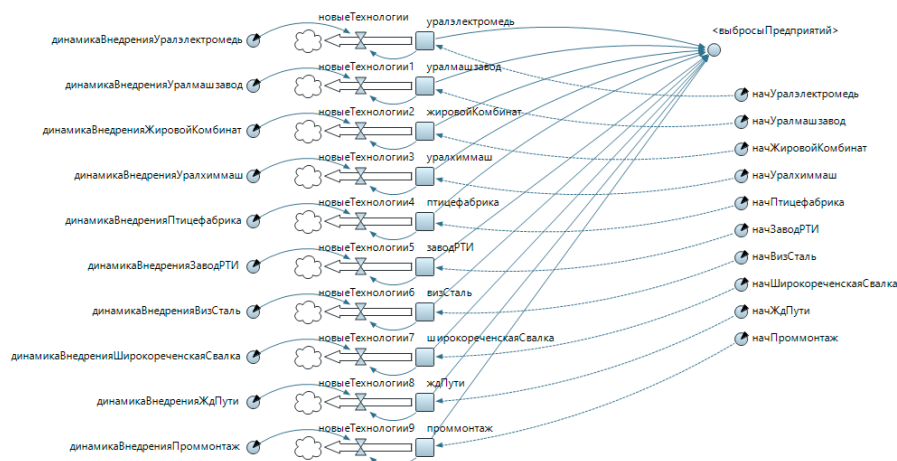


Рис. 4. Структура агента «Предприятия»

Агент «Насаждения» включает в себя диаграммы потоков и накопителей для каждого из семи районов города (рис. 5). Динамика изменения количества гектаров последних учтена для каждого района отдельно с помощью параметров, содержащих количество гектаров насаждений, которые появляются за год. Всего было учтено 13 различных лесопарков Екатеринбурга.

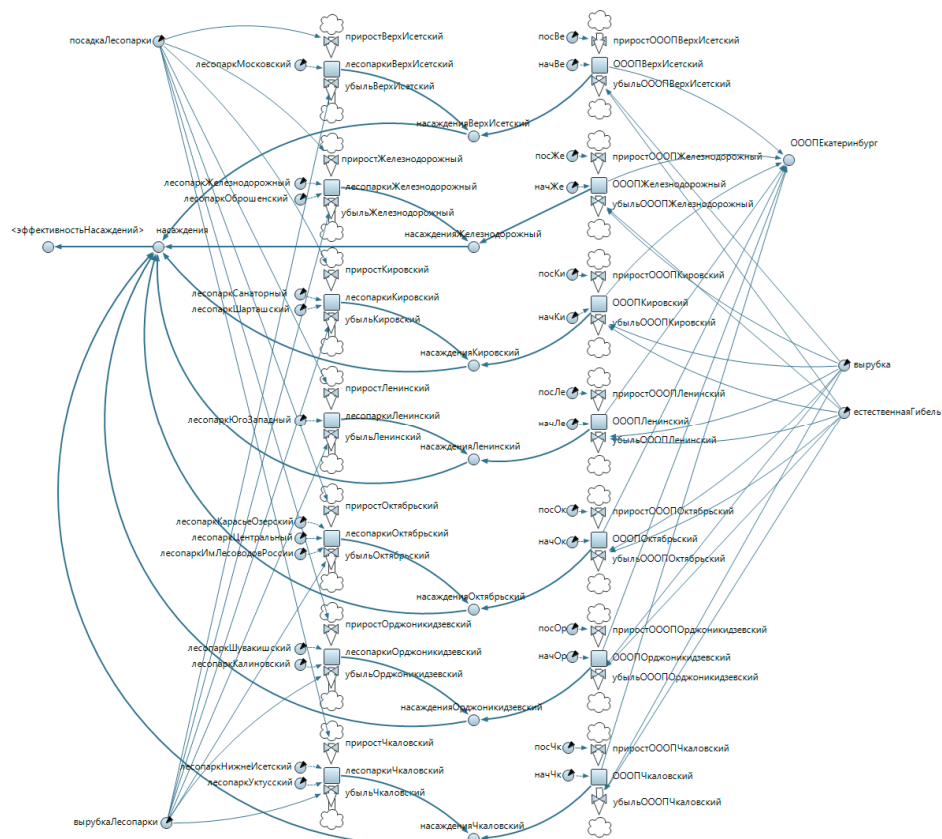


Рис. 5. Структура агента «Насаждения»

Агент «Загрязнение» объединяет три указанных агента и преобразует значение загрязнения атмосферного воздуха во влияние загрязнения на смертность населения (рис. 6).

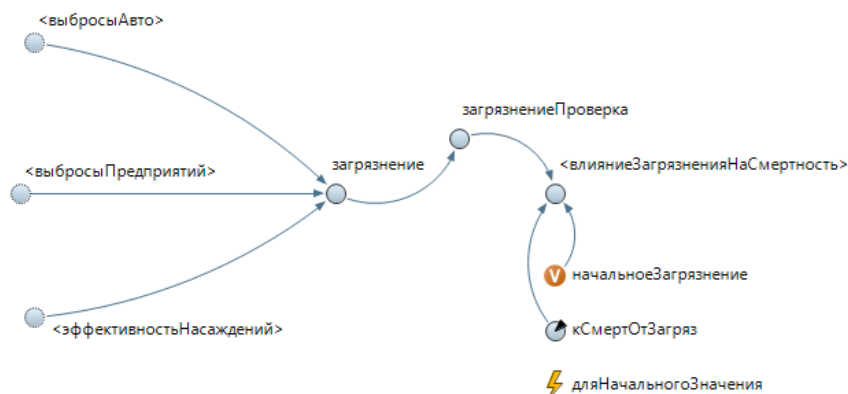


Рис. 6. Структура агента «Загрязнение»

В базовом агенте Main отражена общая структура имитационной модели, где обеспечивается непрерывное взаимодействие объектов (рис. 7), а также спроектирован пользовательский интерфейс, состоящий из двух основных областей просмотра.

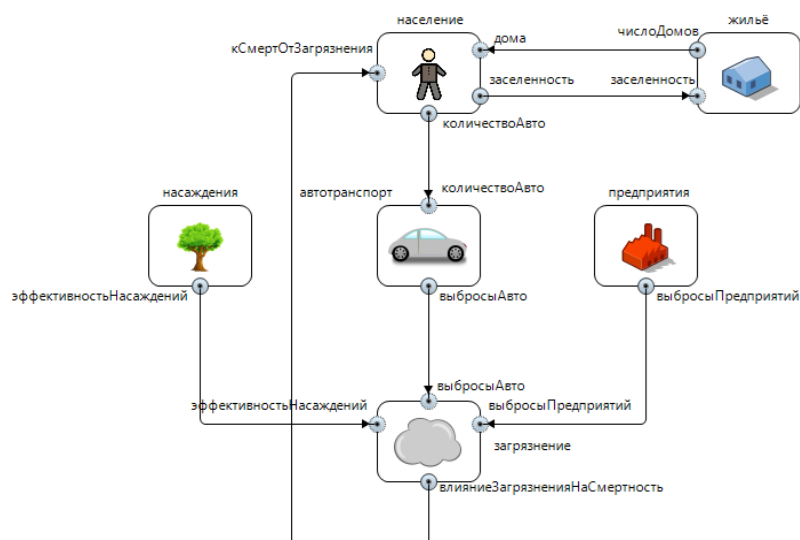


Рис. 7. Структура агента «Main»

Обсуждение

Разработанная в системе AnyLogic имитационная модель позволила оценить текущую экологическую обстановку в городе, а также провести девять модельных экспериментов с прогнозом на 10 лет.

Первый модельный эксперимент – прогнозирование экологической обстановки в городе без введения каких-либо изменений (рис. 8). Выбросы автомобилей за 10 лет увеличились на 7,874 %, что связано с ростом численности населения. Выбросы предприятий сократились на 30,946 % благодаря

внедрению технологий, способствующих этому. При сегодняшней динамике вырубки и посадки зеленых насаждений их площадь за 10 лет сократится на 33,463 %. В результате влияния этих трех главных факторов коэффициент смертности от загрязнений за 10 лет увеличится на 56,757 %.

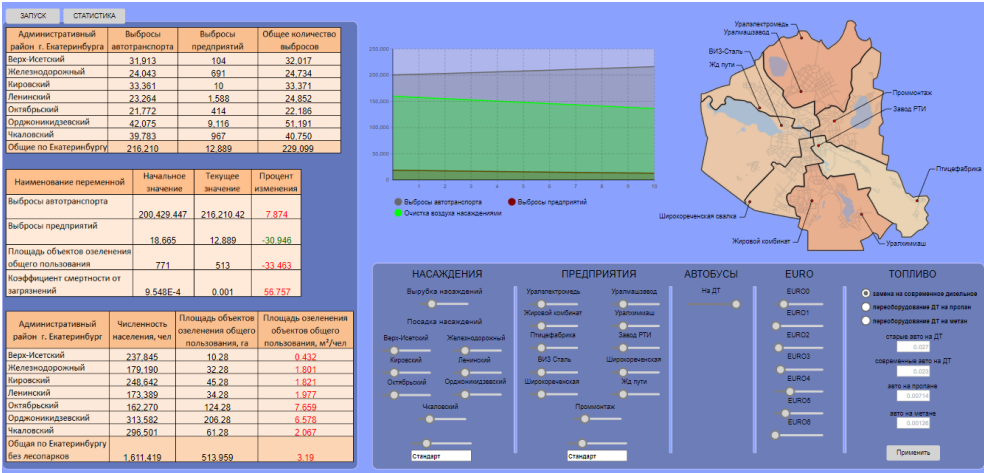


Рис. 8. Эксперимент со стандартными входными параметрами

В качестве вводных данных второго модельного эксперимента принято сокращение вырубки и увеличение посадки зеленых насаждений в городе в 2 раза (рис. 9). Результаты моделирования показывают, что площадь объектов озеленения увеличилась на целых 45,006 %, если сравнивать с прошлым экспериментом, и стала на 11,543 % больше в сравнении с текущим состоянием. Однако стоит заметить, что даже при таком улучшении ситуации средняя площадь насаждений на одного человека почти в 2 раза меньше установленных норм. Коэффициент смертности снизился на 34,521 % в сравнении с экспериментом со стандартными параметрами. Выбросы автотранспорта увеличились на 0,171 %. Такой парадокс отражает петлю обратной связи: уменьшенный коэффициент смертности влечет за собой рост численности населения, что в свою очередь способствует увеличению личного автотранспорта.

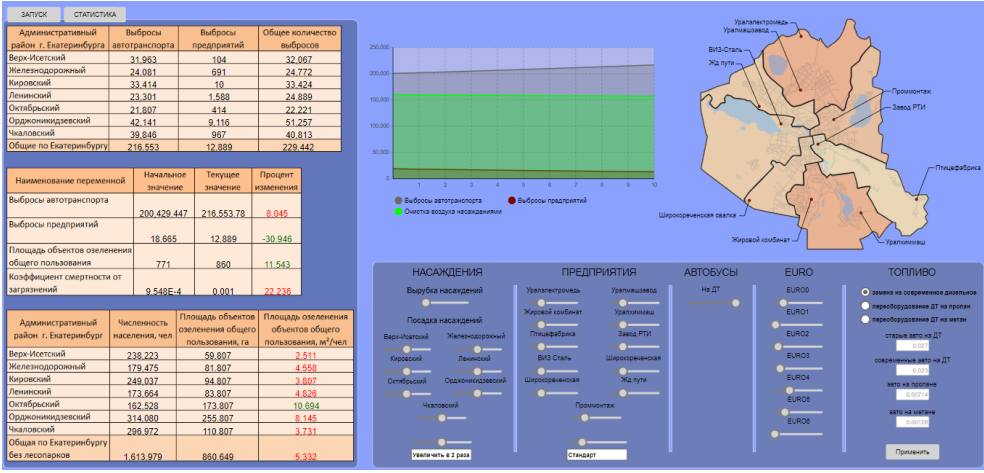


Рис. 9. Эксперимент с изменением динамики посадки и вырубки насаждений

В рамках проведения третьего модельного эксперимента с уменьшением выбросов промышленных предприятий динамика внедрения новых технологий на предприятиях была увеличена в 3 раза. По сравнению с экспериментом со стандартными значениями входных параметров в данном эксперименте количество выбросов от предприятий сократилось на 36,121 %. Выбросы автотранспорта увеличились на 0,07 %, а коэффициент смертности от загрязнений – на 11,138 %.

Четвертый модельный эксперимент в качестве входных данных получил замену автобусного парка на экологичный общественный транспорт, работающий на метане. Коэффициент смертности при этом снизился на 0,145 % в сравнении с первым экспериментом, а количество выбросов автотранспортом увеличилось на 0,005 %. Значения двух других ключевых величин, соответственно, не изменились.

Пятый модельный эксперимент посвящен исследованию экологической ситуации в городе в случае запрета автомобилей с самым низким экологическим классом и их замены на автомобили класса EURO1. При моделировании такой ситуации выбросы автотранспорта уменьшатся на 26,627 % и уже будут иметь положительную динамику по сравнению с текущей. Вслед за этим коэффициент смертности от загрязненного воздуха снизится на 90,053 %.

Шестой модельный эксперимент объединяет в себе предыдущие решения в области регулирования экологической ситуации в городе. При этом получены следующие результаты: выбросы автотранспорта сокращены на 26,487 %, выбросы предприятий – на 36,121 %, количество гектаров зеленых насаждений увеличено на 45,006 %, а коэффициент смертности от неблагоприятной экологической обстановки снижен на 136,039 %.

Больше всего вредных выбросов в атмосферу производят старые автомобили, работающие на дизельном топливе. В последующих трех экспериментах были смоделированы ситуации, при которых данные автомобили были заменены на более современные либо модифицированы под новые стандарты, а также оборудованы газобаллонным оборудованием, работающим на пропане или метане. При первом варианте сокращения старых дизельных автомобилей выбросы снизятся на 6,601 %, а коэффициент смертности – на 22,322 % в сравнении с первым прогоном модели. Вторым вариантом вытеснения автомобилей со старыми дизельными моторами с дорог общего пользования стало оснащение их газобаллонным оборудованием, работающим на пропане. При такой ситуации выбросы автомобилей уменьшились на 11,161 % в сравнении с результатами первого эксперимента, а коэффициент смертности от загрязнений снизился в данном случае на 37,746 %. Третьей возможной версией замены устаревших транспортных средств на дизельном топливе стало оснащение их метановым газобаллонным оборудованием. В таком случае количество выбросов автотранспорта уменьшится на 11,63 %, что на 0,469 % больше, чем в случае с пропаном. Показатель количества смертей на тысячу жителей от загрязнения воздуха уменьшится на 39,333 %.

Общие результаты моделирования аккумулированы в табл. 1. Здесь представлены значения, полученные в ходе модельных экспериментов по прошествии 10 лет. Заданы следующие начальные значения: 200 429 – выбросы автотранспорта, 18 668 – выбросы предприятий, 771 га – насаждения, 0,00095484 (0 %) – коэффициент смертности от загрязнения воздуха.

Таблица 1

Результаты модельных экспериментов

Номер эксперимента	Выбросы автотранспорта, т	Выбросы предприятий, т	Площадь ООП, га	Изменение коэффициента смертности, %
1	216 210	12 889	513	56,757
2	216 553	12 889	860	22,236
3	216 352	6147	513	45,619
4	216 124	12 889	513	56,612
5	162 843	12 889	513	–33,296
6	163 123	6147	860	17,424
7	202 981	12 889	513	34,435
8	193 841	12 889	513	19,011
9	192 900	12 889	513	17,424

Заключение

Использование методов имитационного моделирования при анализе экологической обстановки в крупных городах дает свои результаты. Спроектированная и разработанная в системе AnyLogic имитационная модель хоть и имеет относительно небольшое число агентов, позволяет отразить основные аспекты изменения экологии – автомобильный транспорт, промышленные предприятия и зеленые насаждения.

Проведенные модельные эксперименты дали понять, что, во-первых, при отсутствии каких-либо решений по улучшению экологического состояния города зеленые насаждения при их и так малом количестве сократятся в большинстве районов до минимума. Причем текущая ситуация с объектами озеленения общего пользования настолько плачевна, что даже при сокращении количества вырубаемых насаждений в 2 раза и увеличении динамики посадки насаждений тоже в 2 раза только один район города – Октябрьский – будет соответствовать норме количества насаждений в расчете на одного человека. Ситуация с крупными промышленными предприятиями в городе намного лучше: благодаря введению новых технологий на производстве, вредные выбросы в атмосферу от каждого предприятия сокращаются примерно на 3,7 % каждый год. Увеличение этих темпов в 3 раза сократит количество смертей от загрязнения на 11,138 %. Благодаря проведенным экспериментам выяснено, что замена всего автобусного парка города, работающего на старых дизельных двигателях, автобусами на экологичном метане даст настолько малый результат, что он будет еле заметен в рамках глобальной проблемы. Наиболее эффективным будет запрет автомобилей экологического класса EURO0. Такие автомобили составляют 20 % от общей массы, а выбрасывают в целых 13 раз больше вредных веществ в атмосферу, чем машины самого экологичного класса EURO на данный момент. Коэффициент смертности от загрязненного воздуха при таком решении снизится минимум на 90 %. В эксперименте с заменой старых дизельных авто на более современные получены очень хорошие результаты с учетом того факта, что таких автомобилей всего лишь 2,7 %. Однако дешевле будет переоборудовать автомобиль под работу на газовом топливе. При выборе самого экологически чистого топлива для двигателей внутреннего сгорания – метана – результаты будут

намного лучше: количество выбросов в атмосферу будет меньше на 5,16 %, а искомый коэффициент смертности – на 10,777 %.

Таким образом, для улучшения текущей экологической обстановки наиболее правильным решением будет сокращение вырубки зеленых насаждений и по возможности их посадка, особенно в тех районах, где количество насаждений меньше нормы более чем в 2 раза. Также необходимо вводить запрет на автомобили самого низкого экологического класса EURO и отказывать в постановке их на учет.

Дальнейшие исследования авторов предполагают рассмотрение более широкого спектра факторов, влияющих на экологическую обстановку в городе, добавление новых составляющих имитационной модели, а также расширение пула стратегических решений по улучшению экологии в крупных городах.

Список литературы

1. Forrester J. W. Urban dynamics. Waltham, MA : Pegasus Communications, 1969.
2. Forrester J. W. Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers // Harvard Business Review. 1958. Vol. 36, № 4. P. 37–66.
3. Meadows D. H., Randers J., Meadows D. L. Limits to growth: The 30 year update. London : Earthscan, 2005. 368 p.
4. Meadows D. H. Limits to growth: A Report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. New York : Universe Books, 1972. 211 p.
5. Akopov A. S. Designing of integrated system-dynamics models for an oil company // International Journal of Computer Applications in Technology. 2012. Vol. 45, № 4. P. 220–230.
6. Borshchev A., Karpov Y., Kharitonov V. Distributed Simulation of Hybrid Systems with AnyLogic and HLA // Future Generation Computer Systems. 2002. Vol. 18, № 6. P. 829–839.
7. Кутузов О. И., Татарникова Т. М. Из практики применения метода Монте-Карло // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 3. С. 65–70.
8. Волков Д. В. Имитационное мультиагентное моделирование системы связи специального назначения // International Journal of Advanced Studies. 2017. Т. 7, № 1-2. С. 31–37.
9. Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Погодин В. А., Щербакова-Слюсаренко В. Н. Роль имитационного моделирования в технологическом проектировании и оценке параметров грузовых терминалов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. 2017. № 2. С. 93–102.
10. Боуш Г. Д., Куликова О. М., Шелков И. К. Агентное моделирование процессов кластерообразования в региональных экономических системах // Экономика региона. 2016. Т. 12, № 1. С. 64–77.
11. Lychkina N., Molodetskaya E., Morozova Yu. The Simulation Model of Supply Chains on the Macroeconomic Level is the Tool to Control the Economic Development of the Region // Strategic Innovative Marketing. Springer Proceedings in Business and Economics, 2017.
12. Mathur M., Agarwal S. Sustainability Dynamics of Resource Use and Economic Growth. A Discussion on Sustaining the Dynamic Linkages between Renewable Natural Resources and the Economic System // Discussion Paper. 2015. August. URL: http://www.teriin.org/policybrief/files/aug15/files/downloads/Discussion_paper_Sustainability_Aug2015.pdf
13. Socio-Economic Role of Service – Sector Small Business in Sustainable Development of The Russian Economy / L. G. Rudenko, N. A. Zaitseva, A. A. Larionova [et al.] // European Research Studies Journal. 2015. Vol. 18, № 3. P. 219–234.

14. Кислицын Е. В. Исследование рынка операторов сотовой связи методами имитационного моделирования // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 3. С. 51–63.
15. Кислицын Е. В. Имитационное моделирование процесса кредитования физических лиц с использованием кредитного рейтинга // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Экономика и управление. 2018. № 3. С. 112–118.
16. Кислицын Е. В. Конструирование имитационной модели конкурентоспособности и инновационной активности промышленного предприятия // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2019. № 3. С. 5–19.
17. Осипов Г. С. Исследование простейших моделей математической экологии в среде имитационного моделирования AnyLogic // Бюллетень науки и практики. 2017. № 2. С. 8–22.
18. Переварюха А. Ю. Исследование модели эксплуатируемой популяции со сложными видами апериодической переходной динамики // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2015. № 3. С. 96–103.
19. Заикина И. В., Назаров А. А. Имитационное моделирование в экологии на примере модели развития эпидемии, построенной с применением метода системной динамики // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2013. № 14. С. 66–69.
20. Иванова Д. В. Системный анализ и моделирование экологической эффективности региональной энергетики на примере Самарской области // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2018. № 4. С. 6–18.
21. Михайлов А. Ю., Попова Е. Л., Гайворонский И. Л. Влияние урбанизации на социально-экономические аспекты транспортной и туристической отраслей региона // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 10. С. 203–211.
22. Кахраманова Ш. Ш. К. Моделирование в градостроительстве и экологии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 1. С. 28–40.

References

1. Forrester J.W. *Urban dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications, 1969.
2. Forrester J.W. Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*. 1958;36(4):37–66.
3. Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. *Limits to growth: The 30 year update*. London: Earthscan, 2005:368.
4. Meadows D.H. *Limits to growth: A Report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books, 1972:211.
5. Akopov A.S. Designing of integrated system-dynamics models for an oil company. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2012;45(4):220–230.
6. Borshchev A., Karpov Y., Kharitonov V. Distributed Simulation of Hybrid Systems with AnyLogic and HLA. *Future Generation Computer Systems*. 2002;18(6): 829–839.
7. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. From the practice of using the Monte Carlo method. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 2017;83(3):65–70. (In Russ.)
8. Volkov D.V. Simulation multi-agent simulation of a special-purpose communication system. *International Journal of Advanced Studies*. 2017;7(1-2):31–37. (In Russ.)
9. Kuznetsov A.L., Kirichenko A.V., Pogodin V.A., Shcherbakova-Slyusarenko V.N. The role of simulation modeling in the technological design and evaluation of cargo terminal parameters. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo uni-*

- versiteta. Ser.: *Morskaya tekhnika i tekhnologiya* = *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Ser.: Marine engineering and Technology*. 2017;2:93–102. (In Russ.)
10. Boush G.D., Kulikova O.M., Shelkov I.K. Agent-based modeling of cluster formation processes in regional economic systems. *Ekonomika regiona* = *Economy of the region*. 2016;12(1):64–77. (In Russ.)
 11. Lychkina N., Molodetskaya E., Morozova Yu. The Simulation Model of Supply Chains on the Macroeconomic Level is the Tool to Control the Economic Development of the Region. *Strategic Innovative Marketing. Springer Proceedings in Business and Economics*, 2017.
 12. Mathur M., Agarwal S. Sustainability Dynamics of Resource Use and Economic Growth. A Discussion on Sustaining the Dynamic Linkages between Renewable Natural Resources and the Economic System. *Discussion Paper*. 2015. August. Available at: http://www.teriin.org/policybrief/files/aug15/files/downloads/Discussion_paper_Sustainability_Aug2015.pdf
 13. Rudenko L. G., Zaitseva N. A., Larionova A. A. [et al.]. Socio-Economic Role of Service – Sector Small Business in Sustainable Development of The Russian Economy. *European Research Studies Journal*. 2015;18(3):219–234.
 14. Kislitsyn E.V. Market research of mobile operators using simulation methods. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2017;3:51–63. (In Russ.)
 15. Kislitsyn E.V. Simulation of the process of lending to individuals using a credit rating. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Ekonomika i upravlenie* = *Bulletin of the Voronezh State University. Ser.: Economics and Management*. 2018;3:112–118. (In Russ.)
 16. Kislitsyn E.V. Designing a simulation model of competitiveness and innovation activity of an industrial enterprise. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2019;3:5–19. (In Russ.)
 17. Osipov G.S. Research of the simplest models of mathematical ecology in the AnyLogic simulation environment. *Byulleten' nauki i praktiki* = *Bulletin of Science and Practice*. 2017;2:8–22. (In Russ.)
 18. Perevaryukha A.Yu. Investigation of a model of an exploited population with complex types of aperiodic transition dynamics. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fizika. Matematika. Informatika* = *Bulletin of BSU. Ser. 1, Physics. Mathematics. Computer science*. 2015;3:96–103. (In Russ.)
 19. Zaikina I.V., Nazarov A.A. Simulation modeling in ecology on the example of an epidemic development model constructed using the system dynamics method. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta* = *Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University*. 2013;14:66–69. (In Russ.)
 20. Ivanova D.V. System analysis and modeling of environmental efficiency of regional energy on the example of the Samara region. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki* = *Bulletin of the Samara State Technical University. Ser.: Technical sciences*. 2018;4:6–18. (In Russ.)
 21. Mikhaylov A.Yu., Popova E.L., Gayvoronskiy I.L. The impact of urbanization on the socio-economic aspects of the transport and tourism industries in the region. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2018;22(10):203–211. (In Russ.)
 22. Kakhramanova Sh.Sh.K. Modeling in urban planning and ecology. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* = *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2012;1:28–40. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Витальевич Кислицын

кандидат экономических наук, доцент
кафедры информационных технологий
и статистики,
Уральский государственный
экономический университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 62)
E-mail: kev@usue.ru

Владислав Владимирович Гоголин

магистрант,
Уральский государственный
экономический университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 62)
E-mail: vlad.gogulin@bk.ru

Evgeniy V. Kislitsyn

Candidate of economical sciences,
associate professor of sub-department
of information technology and statistics,
Ural State University of Economics
(62 8 Marta street, Yekaterinburg, Russia)

Vladislav V. Gogulin

Master degree student,
Ural State University of Economics
(62 8 Marta street, Yekaterinburg, Russia)