

УДК 332.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ОСНОВЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА

Бегунов Николай Анатольевич, ст. преподаватель кафедры
Автоматизированных систем управления
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
nikobe@mail.ru

В статье рассматривается применение агентного подхода при моделировании социально-экономического развития муниципальных образований. Описаны структуры агентов на основе аналитических зависимостей, результатов анализа данных и решения оптимизационных задач. Рассмотрен прототип мультиагентной имитационной модели муниципального образования. Предложена методология оценки последствий реализации программ стратегического развития и построения прогнозов на основе имитационной модели.

Ключевые слова: *имитационное моделирование; агент; агентный подход; мультиагентная модель; прогнозирование; социально-экономическое развитие.*

AGENT-BASED CITY DEVELOPMENT SIMULATION

Nikolay Begunov,
senior teacher of the Automated control systems department
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia
nikobe@mail.ru

The article is devoted to the use of agent-based approach for simulation of socio-economic municipalities development. The structures of the agents on the basis of analytical dependences, data mining results and solving optimization problems are considered. The prototype of multi-agent simulation model of the municipality is suggested. This paper proposes a methodology to assess the implications of the strategic program development and forecasts building based on the multi-agent simulation model.

Keywords: *simulation; agent; agent-based approach; multi-agent model; forecasting; economic and social development.*

Несмотря на многообразие работ по совершенствованию механизма социально-экономического прогнозирования, проблема согласования различных подходов и создания комплексной системы стратегического планирования муниципальных образований практически не решалась, блок прогноза социально-экономического развития муниципальных образований отсутствует. В большинстве работ объектом исследования выступают более глобальные региональные и национальные экономики (А.И. Шендрик, В.А.Цыбатов, Д.Л.Андрианов, В.Л.Макаров, А.Р.Бахтизин, Z. Yang, P. V. Dixon, O. Bajo-Rubio and A. G. Gómez-Plana, N. Hosoe, D. Learmonth, M. T. Rimmer, H. Lee, H. D. Jacoby, P. J. Lloyd and D. MacLaren) [1].

В основу большинства исследований положен предложенный в конце 50-х годов XX в. Дж. Форрестером метод системной динамики (СД) для “исследования информационных обратных связей в промышленной деятельности с целью показать как организационная структура, усиления (в политиках) и задержки (в принятии решений и действиях) взаимодействуют, влияя на успешность предприятия”. Системная динамика применяемая для моделирования социальных и урбанистических систем на протяжении более 40 лет могла бы стать основой для реализации имитационной модели муниципального образования, однако, данный подход обладает рядом

недостатков накладывающих существенные ограничения на работу и результаты экспериментов получаемых с помощью модели:

а) поскольку модель оперирует только количествами, агрегатами, объектами, находящиеся в одном накопителе, неразличимы, лишены индивидуальности;

б) аналитику предлагается рассуждать в терминах глобальных структурных зависимостей и, соответственно, ему необходимы соответствующие данные.

Всё это делает невозможным учет большинства данных характеризующих население и предприятия города, а также получение отчетов в различных разрезах аналитики на основании результатов работы имитационной модели. Исключает возможность детального анализа стратегических планов развития крупных муниципалитетов.

С учетом ограничений для моделей системной динамики описанных выше, становится целесообразным использование агентного подхода при моделировании социально-экономического развития города. Появляется возможность представить в виде агента единичного представителя сообщества или предприятие, отразить индивидуальные особенности агента, отследить весь жизненный цикл агента и оценить влияние принимаемых решений объектом, а, следовательно, и на различные группы, в которые входит агент и на группу в целом. В отличие от системной динамики, здесь нет такого места, где централизованно определялось бы поведение (динамика) системы в целом. Вместо этого, определяется поведение на индивидуальном уровне, а глобальное поведение возникает как результат деятельности многих (десятков, сотен, тысяч, миллионов) агентов, каждый из которых следует своим собственным правилам, живёт в общей среде и взаимодействует со средой и с другими агентами.

В случае моделирования систем, содержащих большие количества активных объектов (людей, животных, машин, предприятий или даже проектов, активов, товаров и т.п.), которые объединяет наличие элементов

индивидуального поведения, от сложных (цели, стратегии) до самых простых (временные ограничения, события, взаимодействия) агентное моделирование является подходом более универсальным и мощным, так как оно позволяет учесть любые сложные структуры и поведения.

Другое важное преимущество агентного моделирования в том, что разработка модели возможна в отсутствии знания о глобальных зависимостях: вы можете знать очень немного о том, как вещи влияют друг на друга на глобальном уровне, или какова глобальная последовательность операций, и т.п., но, понимая индивидуальную логику поведения участников процесса, можно построить агентную модель и вывести из неё глобальное поведение [2]. Таким образом, иногда, даже если в принципе и существует, скажем, системно-динамическая модель системы, построить агентную модель может быть проще. И, наконец, агентную модель проще поддерживать: уточнения обычно делаются на локальном уровне и не требуют глобальных изменений. В таком случае, введение новых объектов (предприятий, объектов социальной инфраструктуры, планов стратегического развития) в агентной имитационной модели не изменяет её структуры, что может потребоваться при использовании моделей системной динамики.

В основу разработанной имитационной модели города положена модель открытой экономики. В модели рассматриваются следующие типы агентов муниципального образования (МО) и его окружения: промышленные предприятия, предприятия сферы услуг, население города (домашние хозяйства), рынок товаров и услуг, рынок рабочей силы, бюджет МО, федеральный (и региональный) бюджет, внешняя среда.

Математические модели поведения агентов строятся на основе существующих математических моделей микро- и макроэкономики, с использованием математического программирования и интеллектуального анализа данных (регрессионные зависимости, продукционные системы), а также знания экспертов (рисунок 1).

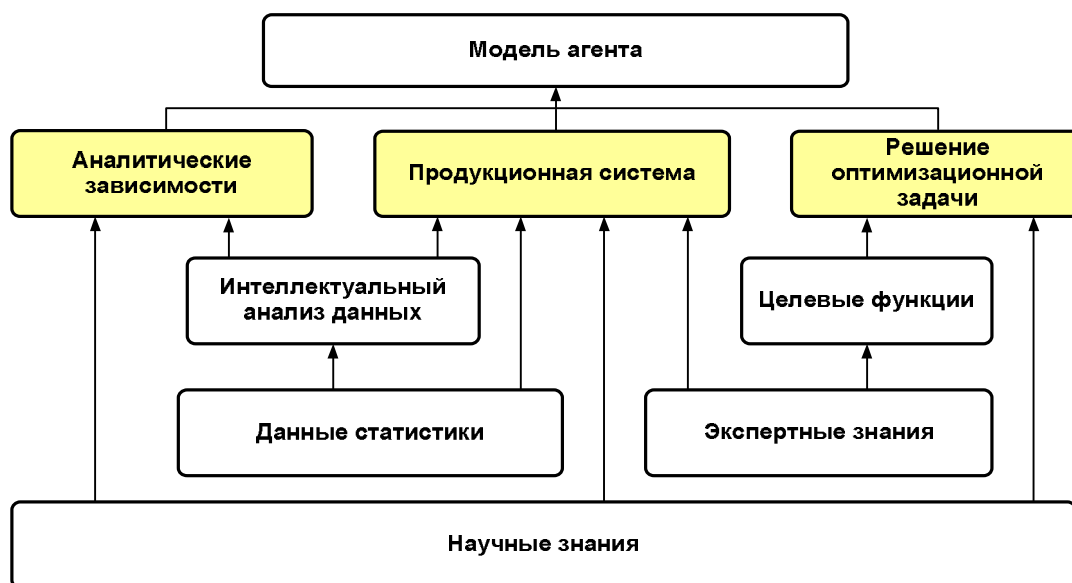


Рис. 1. Подходы к определению моделей агентов

В связи с различными объемами знаний и данных о функционировании агентов совместно использовались модели 2-х типов [3]:

1. Тип 1. «Локальная модель»: значение параметра агента на следующем шаге моделирования определяется на основе внутренних параметров и законов поведения каждого конкретного агента.

2. Тип 2 «Глобальная модель»: значение параметра агента на следующем шаге моделирования определяется на основе внутренних параметров и значений ряда параметров всего множества агентов на предшествующих шагах.

Примером локальной модели является, модель потребления конкретного агента, которая строится исходя из потребностей и существующих возможностей конкретного агента (наличия денежных средств и требуемых ресурсов на рынке). Потребление всех агентов дает общий объем спроса, что соответствует типичному для агентного подхода моделированию «снизу вверх».

Другим примером такого подхода может служить моделирование принятия решения об эмиграции (поступлении в ВУЗ, смене места работы и т.п.), когда

принятие решения осуществляется на уровне агента-человека, при этом учитываются все особенности конкретного агента (пол, возраст, уровень образования, доход и др.). Для построения такого «решателя» необходимо определить полный перечень факторов оказывающих существенное влияние на принятие решения, и установить вероятность принятия положительного решения для каждой из комбинаций факторов на основании статистической информации, то есть заполнить базу знаний агентов (продукционную систему) по определенному вопросу.

Глобальные модели могут быть получены на основе моделей макроэкономики, либо на основе регрессионных зависимостей выявленных методами анализа статистической информации. То есть, при принятии решения по какому-либо вопросу на уровне агента вероятность принятия решения зависит как от характеристик самого агента, так и от характеристик множества агентов. Такие модели предлагается использовать, например, при прогнозировании: рождаемости, смертности, заболеваемости населения и ряда других показателей. Эти модели применяются в тех случаях, когда невозможно учесть всё множество внешних факторов влияющих на поведение группы людей при моделировании каждого человека в отдельности.

Существенным недостатком такого подхода является невозможность точно соотнести выполняемое действие с конкретным агентом. Например, в данном случае, не ясно в какой семье родится ребенок (к какому агенту вида «семья» отнести ребенка, кто его родители). В случае прогнозирования количества эмигрантов таким образом можно получить только общее их количество, но нельзя определить характеристики этих мигрантов.

К плюсам такого подхода можно отнести меньшие требования к статистике по сравнению с локальными моделями. Выбор подхода к построению моделей развития определяется исходя из объемов, структуры и качества имеющейся в наличии статистической информации.

Сочетание локальных и глобальных моделей позволяет адаптировать имитационную модель к использованию статистических данных с различным уровнем детализации.

Два описанных выше подхода могут быть использованы при наличии теоретических знания или достаточного объема статистики и возможности выделить устойчивые зависимости между факторами влияния и конечными результатами.

В имитационной модели муниципального образования был выделен ещё один класс моделей: модели, основанные на поиске эффективных решений на основе заданных целевых функции.

Модели «локальные» и «глобальные», строящиеся с использованием имеющейся статистической информации могут оказаться неадекватными при моделировании условий, с которыми прежде не приходилось сталкиваться (например, кризисные ситуации). В этом случае, становится целесообразным использование моделей на основе алгоритмов поиска эффективных решений для определения логики поведения агентов, задающих поведение объектов модели в различных ситуациях. Такой подход предлагается использовать при определении логики производственных агентов, в различных условиях функционирования, а также в случаях недостаточной статистической базы для построения моделей первых двух типов.

Модель поведения экономического агента состоит из: модели жизненного цикла (ЖЦ) и модели поведения на конкретных этапах развития. При этом каждый интеллектуальный агент в мультиагентной модели развивается в соответствии с собственной моделью поведения, которая может изменяться в рамках его индивидуального жизненного цикла. В модели учитывается, что каждой стадии (состоянии) ЖЦ агент реализует один или множество параллельных процессов (например, потребление товаров и услуг и производство продукции).

Жизненный цикл конкретного агента представлен в виде дискретной системы, при определенных условиях меняющей свои внутренние состояния (режимы функционирования), и задается в виде вероятностного графа переходов между стадиями (режимами) его существования (рисунок 2) [4].

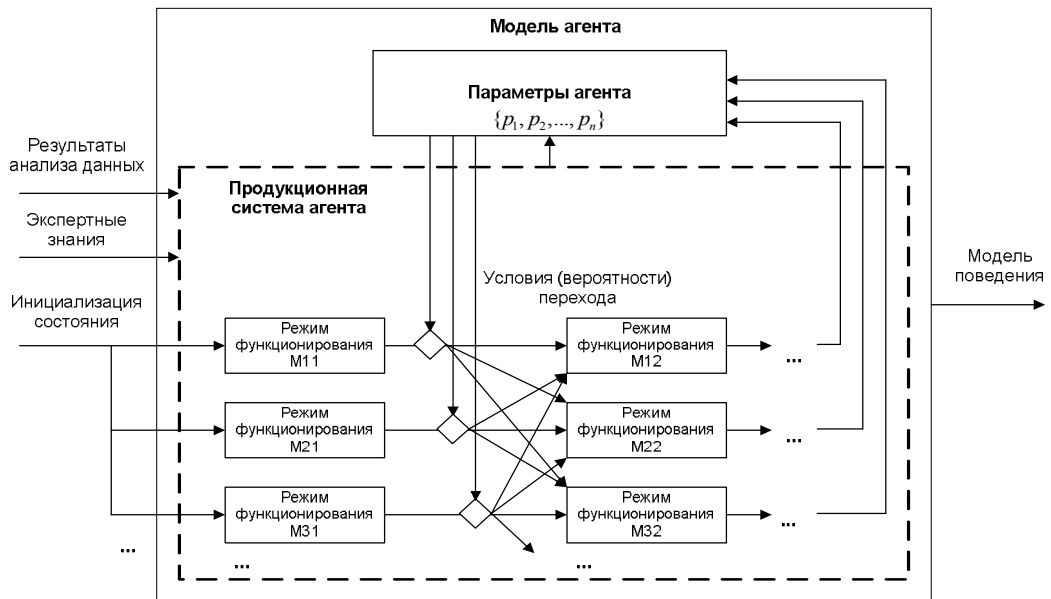


Рис. 2. Граф переходов агента имитационной модели

В зависимости от внешних условий развития могут изменяться целевые установки экономического агента, которые в свою очередь определяют выбор модели функционирования. В процессе функционирования на конкретных этапах развития жизненного цикла экономический агент может находиться в одном или комбинировать несколько базовых режимов функционирования (рисунок 3).



Рис. 3. Режимы функционирования агентов

Модели функционирования определяют:

1. объемы и пропорции спроса на ресурсы необходимые для функционирования агентов;
2. объемы и пропорции производства агентом различных видов товаров и услуг;
3. распределение ресурсов агента по выбранным базовым режимам (на собственное потребление, производство, сбережения и т.п.).

Рассмотрим подходы к моделированию агентов-предприятий. Вопросы моделирования социальных агентов мультиагентной модели рассмотрены в ранее опубликованных работах автора. Анализ современного состояния теории и практики прогнозирования экономического развития показывает, что существуют два основных направления моделирования предприятий. Первое направление связано с построением производственных функций, увязывающих экономическое развитие с динамикой факторов производства. Второе направление предполагает моделирование производства на основе моделей межотраслевого баланса.

В первом случае экономика рассматривается как целостная, неструктурированная единица, на вход которой поступают ресурсы, а на выходе получается результат функционирования в форме валового выпуска или валового внутреннего продукта. Ресурсы рассматриваются как аргументы, а

валовой выпуск или валовой внутренней продукт как функция. Во втором случае экономика структурирована и состоит из конечного числа секторов или «чистых» отраслей, производящих один или несколько продуктов.

Главный недостаток моделей, использующих производственные функции (а это большинство моделей), состоит в том, что эти модели абстрагируются от модели соответствия производимой продукции платежеспособному спросу. Этот недостаток может быть компенсирован совместным использованием с моделями на основе межотраслевого баланса.

Межотраслевой баланс (МОБ, метод «затраты-выпуск») — экономико-математическая балансовая модель, характеризующая межотраслевые производственные взаимосвязи в экономике страны. Характеризует связи между выпуском продукции в одной отрасли и затратами, расходом продукции всех участвующих отраслей, необходимым для обеспечения этого выпуска. Межотраслевой баланс (МОБ) представляет собой таблицу, в которой отражен процесс формирования и использования совокупного общественного продукта в отраслевом разрезе. Таблица показывает структуру затрат на производство каждого продукта и структуру его распределения в экономике.

К методологическим ограничениям межотраслевого баланса относится невозможность в достаточной мере описывать воспроизводственный аспект хозяйственного развития, в частности, распределение добавленной стоимости в отраслях на потребление и накопление. В отличие от моделирования на основе производственных функций, где все внимание уделяется добавленной стоимости, здесь, наоборот, основное внимание уделяется промежуточному потреблению. Модели таких факторов экономического роста, как трудовые ресурсы и технический прогресс, зачастую отсутствуют.

Учитывая описанные выше ограничения моделей межотраслевого баланса, в предлагаемой модели МО предлагается использовать межотраслевой баланс только для описания функций потребления и преобразования ресурсов экономических агентов. А для определения максимальных возможностей

объемов производства предлагается использовать функцию потенциального выпуска, полученную на основе производственной функции (рисунок 4) [5].

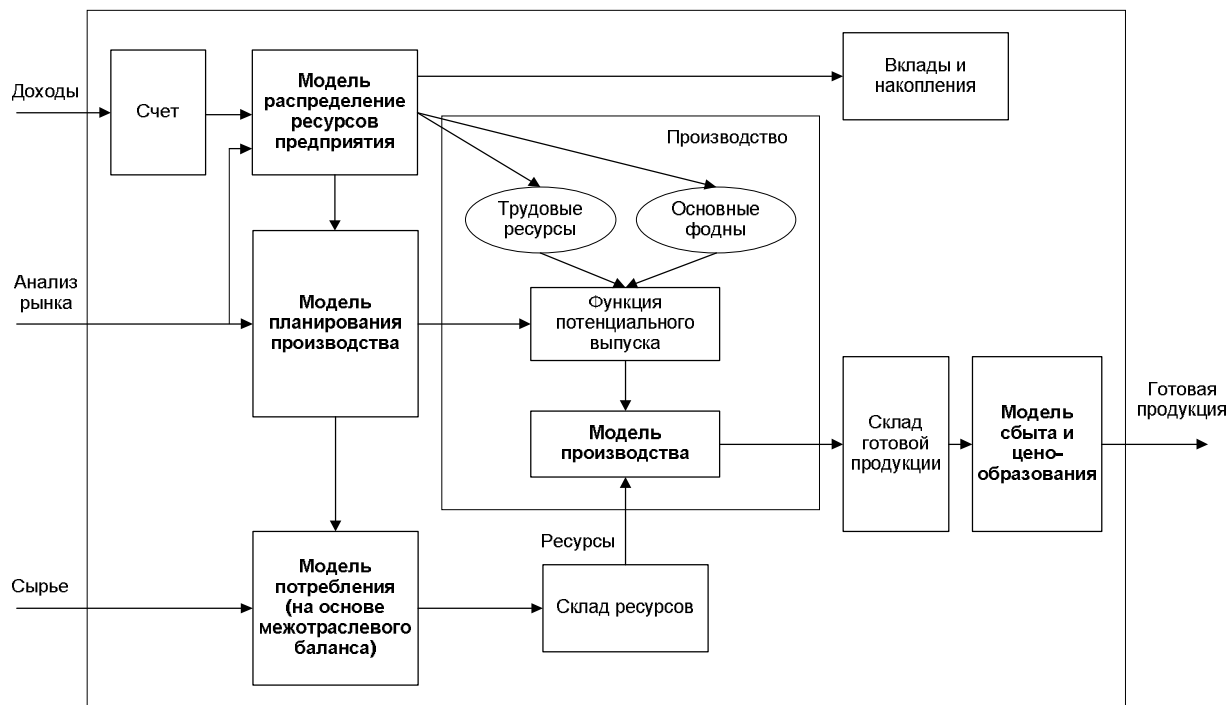


Рис. 4. Система моделей производственного агента

Базовая структура моделируемого в системе производственного агента определяется выражением (1):

$$E = \langle C, Pot, Beh, P, D, Str \rangle, \quad (1)$$

где C – модель потребления (на основе межотраслевого баланса), Pot – модель потенциального выпуска, Beh – модель жизненного цикла производственного агента, D – модель распределения ресурсов, P – модель производства, Str – ресурсы и средства предприятия.

В разработке базовых моделей агента-предприятия использован подход, предложенный В.А. Цыбатовым, на основе функции потенциального выпуска и моделей межотраслевого баланса [6]:

1. Модель потребления производственного агента строится на основе данных межотраслевых балансов.

2. Производственные функции используются при построении функции потенциального выпуска.
3. Распределение ресурсов производственного агента и определение стратегии развития реализуется решением оптимизационной задачи или на основании экспертных оценок.

Распределение ресурсов предприятия происходит исходя из основных факторов, влияющих на развитие предприятия (состояния основных фондов, трудовых ресурсов, объемов производства, продаж, заимствований и т.д.), и стратегических целей развития. Параметры распределения ресурсов и параметры управления производственного агента определяются на основании экспертных данных или в результате решения оптимизационной задачи. Решение задачи подразумевает минимизацию отклонений параметров развития предприятия от плановых значений на заданном горизонте прогнозирования. Определен набор управляющих воздействий. Развитие предприятия определяется решением задачи управления и распределения ресурсов (2), которая имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} |k_1 (VP_{t+\tau}^{план.} - VP_{t+\tau}^{действ.}) + k_2 (PPF_{t+\tau}^{план.} - PPF_{t+\tau}^{действ.})| \rightarrow \min \\ \sum U_t^i + PROD_t^i + IR_t^i + I_t^i = \sum D_t^i + GS_t^i + DI_t^i + RES_t^i \\ a_{t+1}^1 < \Delta VP_{t+1}^i < a_{t+1}^2 \\ \dots \\ a_{t+1}^{n-1} < \Delta Wage_{t+1}^i < a_{t+1}^n \end{array} \right. \quad (2)$$

где: a_{t+1}^n - ограничения на изменения параметров управления, k_i - весовые коэффициенты слагаемых целевой функции, U_t^i - объем ресурсов для собственного потребления в текущем периоде (только для социальных агентов), $PROD_t^i$ - объем ресурсов, выделенный для закупок сырья и производства продукции, IR_t^i - объем инвестиций в основные фонды и трудовые ресурсы, Inv_t^i

- ресурсы, выделенные для инвестиций и обеспечения долга, Inc_{t-1}^i - доходы от реализации продукции в предыдущем периоде, GS_{t-1}^i - объем государственной поддержки в предыдущем периоде, DI_{t-1}^i - доходы от инвестиций в предыдущем периоде, RES_t^i - объем накопленных ресурсов.

Первоочередной задачей при реализации мультиагентной имитационной модели МО являлась оценка влияния стратегических управленческих решений на социально-экономическое развитие города. Предложенная имитационная модель позволяет решать 3 вида задач, связанных с оценкой стратегических проектов развития города [7]:

1. Оценивать потенциальную возможность реализации проекта в условиях ограничения материальных, финансовых, людских и временных ресурсов. Позволяет ответить на вопрос «Возможна ли потенциальная реализация конкретного стратегического проекта?».
2. Оценивать потребности в реализации стратегических проектов, решать вопрос о наличии достаточного количества потребителей товаров или услуг являющихся следствием реализации СП, и как следствие сроках окупаемости, влиянии на экономику города, поступлениях в городской бюджет и т.п.
3. Определять возможные комплексные влияния, в т.ч. взаимное влияние, всего массива СП на СЭР города. Что является крайне сложной задачей при оценке последствий реализации стратегических по отдельности.

На рисунке 5 представлен механизм интеграции данных стратегических проектов в мультиагентную имитационную модель муниципального образования с целью оценки возможностей и последствий их реализации.

1. Для описания развития (изменения) объектов имитационной модели в соответствии с планами стратегического развития города в программном комплексе используется механизм формирования

сценариев (стратегий развития), по которым в указанный момент времени изменяются параметры агентов модели. Для формирования объектов СП в модели МО используются данные мероприятий СП – отдельное мероприятие будет соответствовать вводу нового агента в модель или выбору и изменению параметров существующего.

- В процессе моделирования и по завершении его контрольные показатели из БД СП используются для оценки степени реализации целей СП – показатели задач. По завершении процесса моделирования на основании данных ИМ и БД СП (плановых значений) имеется возможность провести анализ причин того или иного развития событий, с целью выявления проблем взаимного влияния СП и возможностей оптимизации.

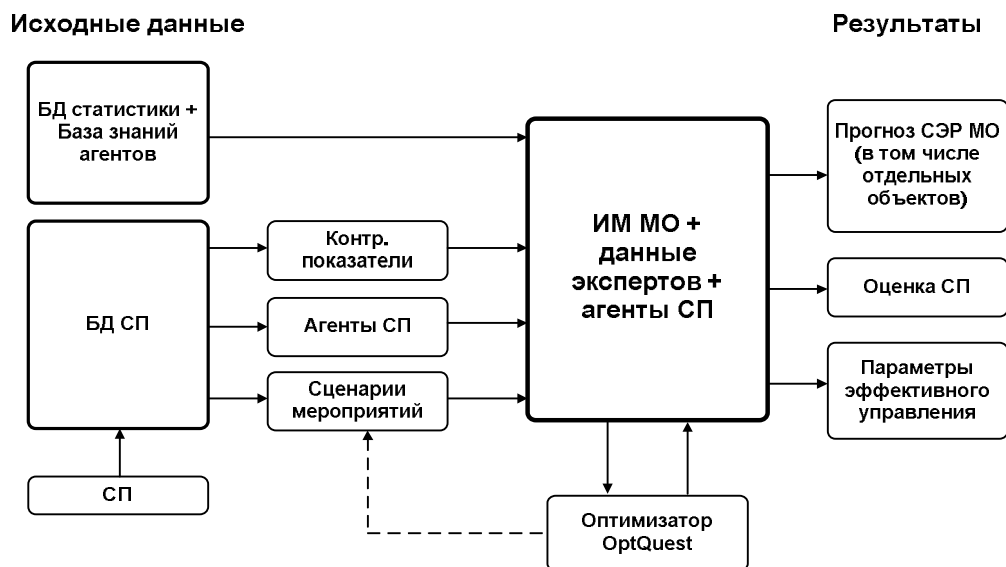


Рис. 5. Интеграция данных СП и мультиагентной ИМ МО

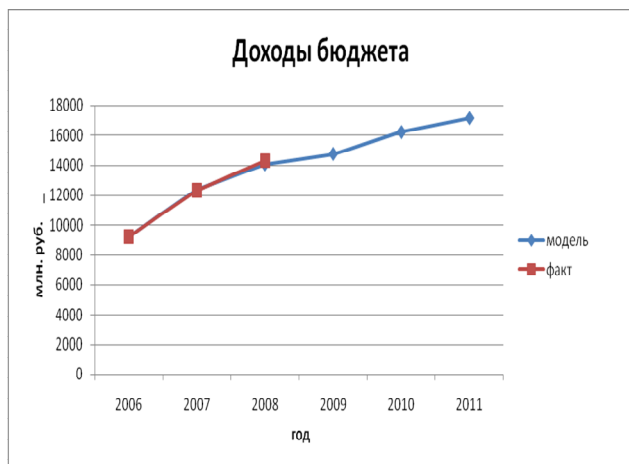
Варианты использования описанной имитационной модели приведены в таблице 1.

**Варианты использования мультиагентной
имитационной модели города**

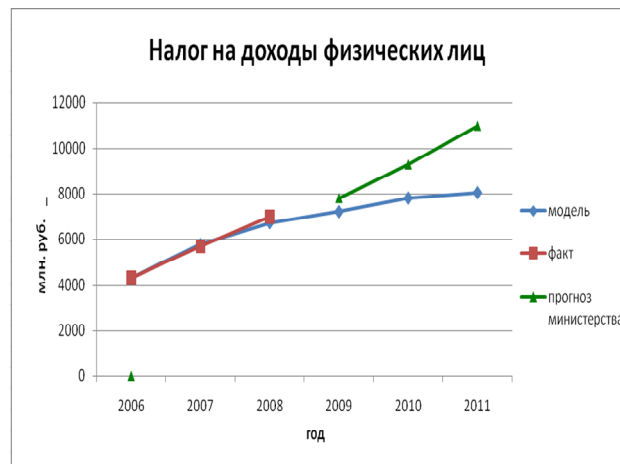
Варианты использования	Особенности
1. Ситуационное моделирование	Прогнозирование социально-экономического развития города в условиях «что будет, если ...».
2. Оценка стратегических проектов	Определение возможностей и последствий реализации стратегических проектов.
3. Проведение оптимизационных экспериментов	Поиск параметров эффективного управления на основе целевых функций.
4. Деловые имитационные игры, коллективная работа по поиску решения	Объединение знаний экспертов и коллективный поиск решений.

В качестве средства для реализации модели была выбрана среда имитационного моделирования AnyLogic 6, как специализированный инструмент, объединяющий возможности разработки с использованием различных подходов, и обеспечивающий одновременную работу до 4 млн. агентов. Разработанная имитационная модель может быть использована для модерирования социально-экономического развития г. Екатеринбурга. Результаты проведенных экспериментов, полученные совместно с Богданович И.А., (таблица 2) демонстрируют высокую степень соответствия прогнозных значений фактическим данным. Ощутимое отклонение от фактических показателей по средней заработной плате объясняется наличием теневого сектора рынка труда, в результате чего в статистику попадают заниженные данные по фактически выплачиваемым заработным платам в г. Екатеринбурге.

Прогноз изменения основных макроэкономических показателей города Екатеринбурга



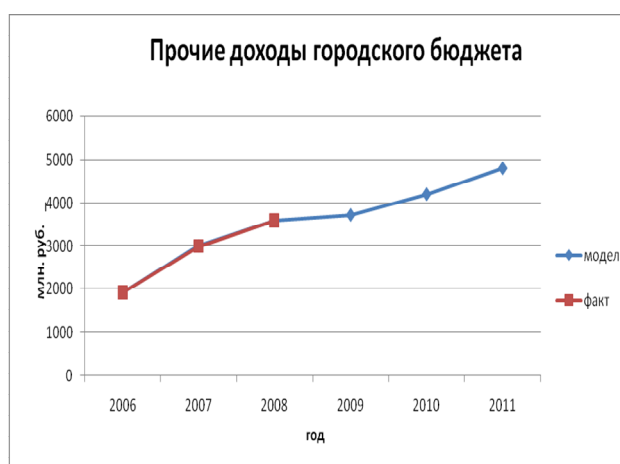
Среднее отклонение от факта – 0.3%



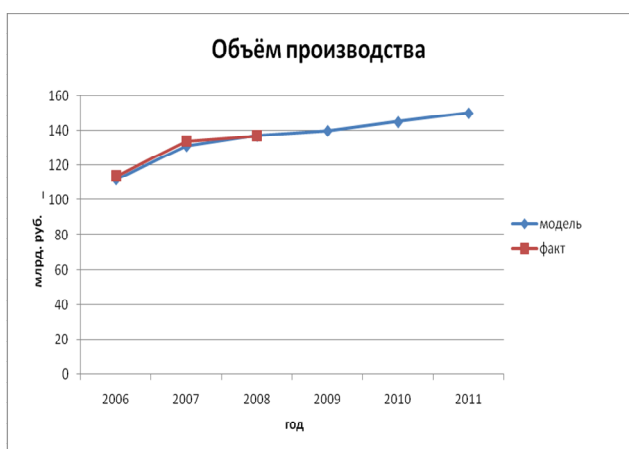
Среднее отклонение от факта – 1,9%



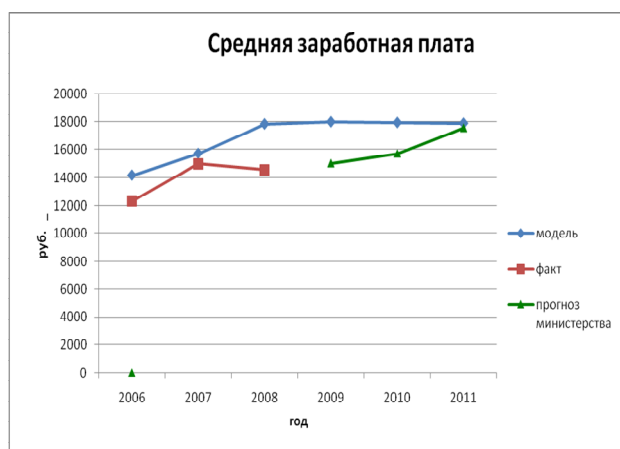
Среднее отклонение от факта – 0.3%



Среднее отклонение от факта – 0.9%



Среднее отклонение от факта – 1.3%



Среднее отклонение от факта – 12%

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых российских ученых (МК-3912.2011.6).

Литература

1. Бахтизин А.Р. Гибрид агент-ориентированной экономики с пятью группами домохозяйств и CGE модели экономики России // Искусственные сообщества: ежекварт. науч. интернет-журнал, 2007. – № 2. – С. 30-75. – URL: <http://www.artsoc.ru/bitrix/templates/.default/components/bitrix/news/documents/bitrix/news.detail/.default/getfile.php?IBID=2&ID=44> (дата обращения: 15.09.11).

2. Мультиагентная имитационная модель муниципального образования / Б.И. Клебанов, И.М. Москалев, Н.А. Бегунов и др. // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2007): сб. докладов / Санкт-Петербург, 2007. – т. 2. – С. 86-90.

3. Технологии Data Mining при разработке мультиагентных имитационных моделей / Б.И. Клебанов, Н.А. Бегунов, И.М. Москалев и др. // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2010. – № 2. – С. 42-47.

4. Принципы построения стратегического ситуационно-аналитического центра администрации крупного муниципального образования / Б.И. Клебанов, А.В. Крицкий, А.В. Немтинов и др. // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – № 12. – С. 167-171.

5. Бегунов Н.А. Имитационное моделирование социально-экономического развития города / Б.И. Клебанов, Е.В. Попов // Журнал экономической теории. – 2010. – № 4. – С. 180-183.

6. Цыбатов В.А. Моделирование экономического роста. – Самара: Изд-во Самар. гос. экон. ун-та, 2006. – 385 с.

7. Бегунов Н.А. Технология прогнозирования развития муниципального образования с использованием имитационной модели / Б.И. Клебанов,

И.М. Москалёв // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – № 4. – С. 39-45.

Рецензент:

Ершова И.В., д.э.н., профессор (Уральский федеральный университет)