

**О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В  
ПРОЦЕССЕ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ  
(ТРАНСФОРМАЦИИ) «УМНЫХ» ГОРОДОВ****Б.И. Клебанов (Екатеринбург)**

Особое место при создании умных городов играет использование информационных моделей, которые являются цифровым отражением актуального (часто в реальном масштабе времени) состояния объектов среды, задействованных в различных сферах городской жизни. Данные модели должны содержать комплекс взаимосвязанных цифровых двойников как неживых инфраструктурных, так и живых социальных объектов среды. Цифровые двойники в такой системе должны отражать состояние описываемых объектов в динамике по ходу всего жизненного цикла, обеспечивать возможность прогнозирования и определения необходимых эффективных управляющих воздействий.

Стратегия развития города в рамках данного подхода должна определять:

- где, как, на основе каких данных и с помощью какого инструментария будет осуществляться цифровизация,
- ключевые точки контроля,
- пути и последствия трансформации с точки зрения всего спектра потребностей горожан и других стейкхолдеров.

Лучшие практики стратегического планирования «умных» городов представлены в серии стандартов, разработанных в Великобритании (PAS 180, 181, 182, 183 ) [1] и др. странах. Они включают, в основном, рекомендации по организации самого процесса планирования, информационному представлению инфраструктурных и интерфейсов объектов городской инфраструктуры.

С точки зрения управления город является сложной слабо формализованной социально-экономической системой, обладающей множеством неявных прямых и обратных связей и часто противоречащими друг другу по целям функционирования элементами. Необходимость учета при принятии решений большого количества разнообразных факторов увеличивает риск принятия неверного решения, которое может негативно сказаться на всех объектах экономики и социальной сферы города. Указанное обстоятельство существенно повышает сложность стратегического планирования и управления развитием «умного» города.

Крупная консалтинговая компания Roland Berger провела в 2017 и 2019 г.г. анализ состояния стратегического планирования 87 и 153 умных городов [2, 3]. Были изучены официальные стратегии трансформации умного города и текущие результаты их реализации. Оказалось, что стратегиям большинства городов не хватает целостной перспективы, которая охватывает все части общества и все соответствующие аспекты городской жизни. Они не имеют всеобъемлющего подхода, стремясь подчеркнуть мобильность, энергетику и правительственные темы, не обращая внимания на сферы образования, здравоохранения и зданий. Многие стратегии оказались смесью отраслевых стратегий, не связанных между собой, т.е. сбором изолированных проектов. Roland Berger видит решение этой проблемы в создании единого центра, отвечающего за координацию и перекрестное связывание мероприятий по цифровизации.

Аналогичное мнение высказывает консалтинговая компания Deloitte [4], которая отмечает, что умные города требуют единого правительства, которое может одновременно выполнять несколько жизненно важных ролей:

- определение и популяризация стратегии развития города;
- законодательное регулирование;
- выработка стандартов и принятие мер для обеспечения устойчивости и безопасности транспортной инфраструктуры, энергетических и цифровых сетей;
- рассмотрение и стимулирование инвестиционных проектов;

- создание среды, в которой новые предприятия и интеллектуальные решения могут появляться и расти;
- налаживание совместной работы различных структур.

Город, как объект стратегического планирования, имеет высокую сложность, обусловленную столкновением интересов большого количества участников планирования. При этом следует учесть, что ряд участников являются представителями отраслевых направлений. Они чаще всего планируют развитие системы исключительно с позиций конкретной отрасли, не учитывая, либо учитывая в минимальном объеме интересы других отраслей, а также связанных между собой территориальных образований, интересы которых затрагивает предполагаемая стратегия трансформации.

Из вышесказанного следует, что уже на стадии проектирования цифровых двойников необходимо сформировать систему совмещения между собой отраслевого и территориального аспектов планирования, максимально приблизив ее к наиболее часто используемой в мировой практике системе планирования и управления социально-экономическими процессами. Кроме того, особую роль в процессе стратегического планирования и дальнейшего развития города играет учет влияния решений на население города и внешних стейкхолдеров, а также их обратного влияния на городские процессы. Однако этой проблеме в силу ее сложности уделяется пока недостаточно внимания.

Поиск эффективных стратегических решений требует создания методов и моделей анализа эффективности и возможных противоречий, предлагаемых участниками, играющими одинаковые или различные роли в разработке стратегии. При создании системы поддержки стратегического планирования и текущего управления городом на основе цифровых двойников нужно решить ряд проблем:

- какие модели использовать для анализа вариантов трансформации и создания цифровых двойников различных типов живых и неживых объектов городской
- как приблизить язык описания моделей к языку специалистов конкретных предметных отраслей и экспертов-стратегов
- как сделать так, чтобы наиболее полно учесть особенности поведения всех существенных объектов городской среды, в том числе населения города и внешних стейкхолдеров.

Основные пути разрешения данных проблем заключаются в следующем. Первая проблема. Известно, что математические модели экономики подходят к своему пределу сложности, несмотря на необходимость все более точно отражать действительность [5]. Единственно возможным средством для решения поставленных задач является, на наш взгляд, создание цифровых двойников и имитационное поведенческое моделирование, которое позволяет учесть индивидуальные характеристики и особенности поведения и взаимодействия отдельных объектов и оценить эффект цифровизации. Конечно, создание ИМ умных городов, требует больших вычислительных ресурсов. Часто для решения подобных задач используются суперкомпьютеры. Перспективным путем решения второй проблемы является создание высокоуровневого языка определения и использования моделей разработчиками цифровых двойников, не требующего программирования. Третья проблема заключается в следующем. Разработанные и реализованные проекты умных городов (Лондон, Барселона, Нью-Йорк и др.), в основном охватывают: энергетику, транспорт, водоснабжение и водоотведение, строительство и инженерные инфраструктуры. К сожалению, при разработке данных планов пока слабо учитывается индивидуальные свойства, связи, склонности, поведение и история развития населения конкретного города.

На необходимость более тонкого учета поведения отдельных активных агентов при и прогнозировании развития сложных социально-экономических систем обращают внимание ведущие ученые мира. Вопросам важности учета поведения личности в экономике посвящены работы лауреатов Нобелевской премии по экономике Д. Каннемана и А. Тверски (2002 г.) и Р. Талера (2017г.). С точки зрения лауреата Нобелевской премии Ильи Пригожина [6] важным направлением в решении данной проблемы является анализ влияния малых флуктуаций на

развитие общества. В частности, речь идет об анализе того, как в результате деятельности отдельных агентов вся система переходит сначала в неустойчивое, а затем в новое устойчивое состояние. Пригожин считает, что нельзя строить прогноз развития только на статистических данных по множеству агентов, нужно учитывать индивидуальное поведение. Особую проблему при анализе, отмечает он, составляет реакция системы на введение новых единиц, способных размножаться и вовлекать во взаимодействие различные процессы, протекающие в системе. Вводимые в небольшом количестве в систему новые агенты приводят к возникновению новой сети реакций между ними. Новая сеть реакций начинает конкурировать со старым способом функционирования и часто ведет к непредсказуемым последствиям. У. Б. Артур [7], один из пионеров науки о сложности - науки о том, как модели и структуры самоорганизуются, рассматривает два основных фактора, порождающих данный процесс: индивидуальный процесс принятия решений и научно-технический прогресс. Одним из способов учета первого фактора, считает он, является создание моделей, в которых агенты формируют индивидуальные убеждения (возможно, несколько убеждений) или гипотезы (внутренние модели) относительно ситуации, в которой они находятся. Агенты непрерывно обновляют данные убеждения и гипотезы, приводя их в соответствие с актуальным состоянием реальности. Это означает, что они постоянно адаптируются, отказываясь от тех или иных действий и стратегий и заменяя их другими, обучаясь опытным путём - осуществляя «разведывание» (explore). Учет второго фактора, технологического прогресса требует отражения в модели стремления человека к экономии усилий при реализации потребностей и появления новых, более совершенных средств их удовлетворения. У. Б. Артур рассматривает модель развития общества как алгоритмическую систему с непрекращающимся в огромных масштабах вычислением (computation), характеризуемым массовым параллелизмом, стохастическим, с определенным порядком действий и последовательностью событий. Аналогичные выводы относительно использования экономической аналитики и поведенческого моделирования делает академик В.Л.Макаров [5].

В данный момент не существует удобных для экспертов, не говоря уже об эффективных, компьютерных инструментов для моделирования процессов развития общества и влияния отдельных личностей на это развитие. Основным направлением здесь является применение мультиагентных имитационных моделей для анализа, прогнозирования и управления социальных и экономических процессов, которое активизировалось в 90-е годы прошлого века, когда сначала появились инструменты StarLogo, Swarm и NetLogo, затем RePast и AnyLogic. Однако, в настоящее время существует относительно мало абстрактных архитектур для создания моделей когнитивных агентов, способных воспроизводить процесс мышления человека. Большинство существующих мультиагентных моделей направлено на изучение конкретных сфер общества и не затрагивает возникновение социального взаимодействия в целом. Как отмечает В.Л. Макаров, практически все существующие АОМ рассматривают отдельную отрасль либо небольшую популяцию агентов. Последнее обусловлено сложностью создания моделей с использованием существующих средств, требующих навыков программирования, не предоставляющих экспертам предметных отраслей описывать проведение объектов среды, в том числе, активных агентов, непосредственно на языке своей предметной области.

Из вышеизложенного следует, что перспективным направлением исследований в данной сфере является разработка теоретических основ и построения инструмента с удобным и понятным интерфейсом, позволяющим самим экспертам строить модели, проводить различного рода эксперименты с цифровым двойником (имитационной моделью) городской среды, в которой действуют конкретные личности и организации со своими потребностями и возможностями. Кроме того, подобный инструментальный позволит оценивать влияние прогресса и появления новых технологий и объектов на жизнь отдельных личностей, всего общества и среды обитания.

Основой инструментария (фреймворка) могут служить:

- интегрированный комплекс типовых мультиагентных моделей социально - экономического развития города, построенных на принципах динамической актуализации потребностей всех типов стейкхолдеров (агентов) городской среды,

- новый высокоуровневый интерфейс для аналитиков-экспертов, который позволит;
- модернизировать модели комплекса без участия программистов;
- представить в интегрированном виде историю, состояние и прогнозы развития объектов городской среды на линейке времени для всех участников процесса стратегического планирования и управления реализацией проектов;
- проводить эксперименты с комплексом моделей с целью определения наиболее рациональных направлений развития города и анализа рисков.

На наш взгляд, в качестве наиболее подходящей моделью поведения стейкхолдера может быть использована модель расширенного гибридного (непрерывно-дискретного) автомата [8], представленная следующей структурой.

$$H = (S, Q, X, P, R, F, \text{Init}, \text{Inv}, E, G, L, V),$$

где:

$S$  – структура автомата, включающая тело, рецепторы, эффекторы и систему управления

$Q$  – множество дискретных состояний;

$X$  – множество непрерывных переменных – характеристик элементов автомата;

$P$  – множество потребностей;

$R$  – множество доступных агенту рецептов удовлетворения потребностей;

$F: Q * X \rightarrow X$  – векторное поле, описывающее динамику изменения непрерывных переменных автомата в рамках конкретных дискретных состояний, которое включает следующие типы функций:

- $f g_i(p_i)$  – функция генерации  $p_i$  потребности
- $f v_i(p_i)$  – функция выбора рецепта удовлетворения  $p_i$  потребности, если на выбор тратится время
- $f e_i(r_i)$  – функция исполнения  $r_i$  рецепта удовлетворения  $p_i$  потребности (экземпляры функций)
- $\text{Init} \subseteq Q * X$  – множество начальных состояний;
- $\text{Inv}: Q \rightarrow 2^X$  – область допустимых значений переменных автомата для каждого  $q$ ;
- $E \subseteq Q * Q$  – множество дуг-переходов между дискретными состояниями;
- $G: E \rightarrow 2^X$  – предикаты перехода по соответствующей дуге между парой дискретных состояний;
- $L: E * X \rightarrow 2^X$  – множество правил, определяющее изменение начальных значений переменных автомата при переходе по соответствующей дуге между парой дискретных состояний.
- $V$  – функция предпочтения, используемая при выборе рецепта реализации потребности.

С точки зрения глобального внешнего наблюдателя (исследователя) состояние агента  $Q(t)$  в каждый момент времени определяется его действительным (реальным) физическим состоянием  $QP(t)$  и ментальным представлением самого агента о его физическом состоянии и состоянии внешней среды  $QM(t)$ . Другими словами  $Q(t)$  можно представить выражением:  $Q(t) = QP(t) + QM(t)$ .

Текущие физические данные в момент  $t$  включают: место расположения; потребности агента; принятые решения и их результаты; состояние процессов реализации действующих потребностей; состояние рецепторов, эффекторов и организма агента; установленные отношения агента с внешними объектами; состояние процессов, протекающих внутри организма и генерирующих базовые потребности; доступную текущую информацию об объектах внешней среды, в т.ч. «попутную» историю поведения агента.

Рецепт удовлетворения потребности задается структурой [9]:

$$r = (tp, f, \text{inp}, \text{out}, \text{isp}, \text{upr}, \text{usl}),$$

где:  $tp$  – тип рецепта;  $f$  – функция рецепта;  $\text{inp}$  – требуемые входные ресурсы;  $\text{out}$  – результаты применения рецепта;  $\text{isp}$  – требуемые средства исполнения;  $\text{upr}$  – необходимые средства управления;  $\text{usl}$  – обязательные внешние условия.



Следует отметить, что в качестве любых из вышеперечисленных ресурсов и средств рецепта могут использоваться как пассивные, так и активные объекты, представленные расширенными гибридными автоматами.

Все модели изменений пассивных объектов городской среды могут быть представлены частными случаями модели расширенного гибридного автомата, что позволяет сохранить однообразие интерфейсов при работе с различными типами объектов и снизить сложность движка модели.

«Движком» имитационной модели умного города является система динамической актуализации потребностей социальных и институциональных агентов, учитывающая постоянное стремление агентов к усилению и/или сохранению своих возможностей, а также процессы развития пассивных объектов городской среды.

В основу построения функции предпочтения  $V$  положена теория мотивации, предложенная К. Левиним и развитой его учениками [10]. Следуя этому подходу, достижимость результата можно определить через требования к ресурсам, средствам, в том числе временным, необходимым для реализации рецепта. Разные варианты действий (рецептов) могут обеспечивать разную валентность (ценность) результата исполнения для агента и разную валентность потерь в случае неудачи при использовании выбранного рецепта. В соответствии с этим в движке в качестве функции предпочтения используется формула взвешенной результирующей валентности при выборе рецепта  $r$  ( $V_r$ ):

$$V_r = (V_{re} * W_e) - (V_{rm} * W_m),$$

где  $V_{re}$  - валентность успеха (ценность) при выборе результата  $r$ ,  $W_e$  – вероятность успеха,  $V_{rm}$  - валентность неудачи (потери),  $W_m$  - – вероятность неудачи.

Предусмотрено, что агент может параллельно реализовать несколько потребностей. При появлении каждой новой потребности и возможности ее удовлетворения параллельно с другими процессами происходит интеграция действующих процессов с процессами цикла реализации новой потребности. После реализации потребности ее процессы удаляются из будущего состояния.

Условно процесс интеграции и дезинтеграции процессов и их влияние на состояние агента можно представить выражением:

$$Q(t + dt) = Q(t) - QPvip(t) + QPnov(t) + FP(t) + FM(t),$$

где  $QPvip(t)$  – изменение реального текущего состояния агента за счет освобождения ресурсов и средств, задействованных во всех законченных в данный момент рецептах удовлетворения потребностей;  $QPnov(t)$  – изменение реального текущего состояния за счет захвата ресурсов и средств, задействованных во всех новых, запущенных в данный момент рецептах;  $FP(t)$  – изменения реального состояния внутренних параметров агента, внешних ресурсов и отношений, связанных с окончанием исполнения рецептов текущий момент времени, а также изменения попутной информации;  $FM(t)$  – изменения ментального представления агента.

Принято, что рецепт  $k$  можно использовать для реализации потребности  $i$ , если тип результата рецепта  $TypeoutR(k)$  соответствует типу потребности  $TypeP(i)$

В процессе реализации потребности определены следующие состояния:

- $qgenP(i)$  – состояние генерации потребности;
- $qplan$  – состояние планирования процессов реализации потребностей;
- $qR(i, k)$  – состояние процесса исполнения потребности  $i$  с использованием выбранного рецепта  $k$ .
- Предикаты и события:
- $BegP(i)$  – индикатор возникновения потребности  $i$ ;
- $GotRM(k, i)$  – индикатор готовности рецепта  $k$  исполнению потребности  $i$  на основе  $QM(t)$ ;
- $ViborRM(k, i)$  – индикатор выбора рецепта  $k$  для реализации потребности  $i$  на основе  $QM(t)$ ;

- $EndR(k, i)$  –индикатор окончания выполнения рецепта  $k$  при реализации потребности  $i$ ;
- $IntR(k, i)$  –индикатор прерывания выполнения рецепта  $k$  при реализации потребности  $i$  в случае невозможности его дальнейшего исполнения или необходимости использования его средств или ресурсов для реализации более приоритетной потребности;
- $qPvip(t, k, i)$ – индикатор изменения реального текущего состояния агента за счет освобождения ресурсов и средств, задействованных при выполнении рецепта  $k$  для потребности  $i$ ;
- $qPnov(t, k, i)$ –индикаторизменения реального текущего состояния за счет захвата ресурсов и средств, задействованных в запущенном в данный момент рецепте для потребности  $i$ ;
- $GenPM(k, i)$  – функция генерации вторичных потребностей рецепта  $k$  для реализации потребности  $i$  на основе  $QM(t)$ .

Переходы между состояниями процесса исполнения потребности  $i$  и соответствующие изменения состояния  $Q$  агента определяются в виде псевдокода следующими выражениями:

• IF  $BegP(i)$  THEN  $qgenP(i) \rightarrow qplan$ ;

•  $qPnov(t, k, i) = qplan$ ;

/\*При возникновении потребности происходит переход к планированию, параллельно выполняются ранее запущенные процессы реализации потребностей\*/

IF  $(TypeP(i) = TypeoutR(k) \& GotRM(k, i) \& ViborRM(k, i))$  THEN  $qplan \rightarrow qR(i, k)$ ;

$qPvip(t, k, i) = qplan$ ;

$qPnov(t, k, i) = qR(i, k)$

/\*При выборе подходящего рецепта, который может быть выполнен в данный момент времени происходит переход к исполнению рецепта\*/

IF  $(TypeP(i) = TypeoutR(k) \& (GotRM(k, i) \& ViborRM(k, i)))$  THEN  $\{GenPM(k, i), qplan \rightarrow qplan\}$

/\*Если выбранный рецепт не готов к исполнению, генерация вторичных потребностей и повторение планирования\*/

IF  $EndR(k)$  THEN  $qR(i, k) \rightarrow qplan$

/\*Когда исполнение рецепта окончено, переход к планированию следующей потребности\*/

$qPnov(t, k, i) = qplan$ ;

$qPvip(t, k, i) = qR(i, k)$

IF  $IntR(k)$  THEN  $\{GenPM(k); qR(i, C) \rightarrow qplan\}$

/\*Если исполнение рецепта прервано, то генерация потребности для окончания рецепта  $k$  и переход в состояние планирования\*/

В работе движка используются две базы: объективная с т.з. исследователя база знаний (ОБЗ) и база актуальных данных (ОБД). В ОБЗ хранятся сведения о возможных типах объектов, их базовых и вспомогательных потребностях и возможных рецептах их удовлетворения. По сути дела, в ОБЗ представлена онтология предметной области. В ОБД представлены текущие данные экземпляров объектов. Кроме того, для каждого агента определены локальные (ментальные) базы знаний и данных (ЛБЗ и ЛБД), представляющие собой часть ОБЗ и ОБД посредством наложения определенной маски доступности и локального искажения. Благодаря этому агенты получают возможность к развитию в зависимости от задаваемых факторов внешней среды, собственных возможностей и способностей.

Предусмотрено, что создание моделей конкретных объектов будет осуществляться без использования программирования на основе индивидуального наследования экземплярами активных и пассивных объектов свойств и знаний, представленных в ОБЗ.

В заключение следует отметить следующее:

Качество процессов трансформации умных городов может быть существенно улучшено за счет использования комплексных имитационных моделей, учитывающих динамику развития пассивных и активных объектов городской инфраструктуры, а также индивидуальные особенности поведения жителей в процессе реализации потребностей

Предложенная архитектура модели города может использоваться не только для анализа возможных путей трансформации города в умное состояние, но и может играть роль интеллектуальной части действующей киберфизической системы умного города. Другими словами, построенная модель города, питаемая актуальными данными физической среды, может быть использована как его виртуальный двойник.

Разработка и внедрение интегрированного комплекса моделей, использующих реальные данные о взаимодействующих объектах города, позволит повысить качество как принимаемых стратегических решений и так и мониторинга их реализации.

#### Литература

1. Британский Институт Стандартов (BSI). URL:<https://shop.bsigroup.com/Navigate-by/Standards/> (дата обращения: 16.09.2019).
2. Smart city, smart strategy. URL: [https://www.rolandberger.com/publication\\_pdf](https://www.rolandberger.com/publication_pdf) (дата обращения: 16.09.2019)
3. The Smart City breakaway. URL:[https://www.rolandberger.com/publication\\_pdf](https://www.rolandberger.com/publication_pdf) (дата обращения: 16.09.2019)
4. Smart cities and the vital role of the government. URL: <http://digitalestedagenda.nl/smart-cities-and-the-vital-role-the-government/>(дата обращения: 16.09.2019)
5. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Социальное моделирование - новый компьютерный прорыв (агент - ориентированные модели) / - Москва: Экономика, 2013
6. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. - М.: Прогресс, 1986. - 432 с.
7. Артур УБ. Теория сложности в экономической науке: иные основы экономического мышления//Пространство экономики. 2015. №2]
8. Колесов. Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход [Электронный ресурс] / Сениченков, Колесов .— СПб. : БХВ-Петербург, 2012 .— 185 с. — ISBN 5-94157-579-3 .— URL: <https://rucont.ru/efd/192405> (дата обращения: 16.09.2019)
9. Клебанов Б.И., Парфенов Ю.П., Антропов Т.В. Рецепт поиска и выбора в мультиагентной модели развития общества // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 9-2. – С. 317-321; URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41747> (дата обращения: 16.09.2019).
10. Мотивация и деятельность / Х. Хекхаузен. — 2-е изд. — СПб.: Питер; М.: Смысл, 2003. — 860 с: ил. — (Серия «Мастера психологии»)