

# Моделирование агентного окружения при разработке мультиагентной системы на примере крупномасштабных инфраструктурных проектов

Т. Н. Есикова<sup>1</sup>, С. В. Вахрушева

Мультиагентное моделирование позволяет отразить неоднородность, уникальность, многообразие и динамику взаимодействия конкретных экономических акторов, а значит, и структуру моделируемого процесса наиболее приближенно к реальности. Это обусловило выбор мультиагентного подхода в качестве инструмента имитационного моделирования процесса реализации крупномасштабного инфраструктурного проекта на примере ТКМ (трансконтинентальной магистрали) через Берингов пролив на территориях Азиатской России. В статье изложены основные идеи формирования ключевой части мультиагентной системы – окружения агентов (информационного пространства) как аналитической основы принятия решений акторами различной природы (экономическими, управленческими и др.).

*Ключевые слова:* мегапроекты, мультиагентные системы (МАС), агенты, среда взаимодействия агентов, архитектура МАС, оценка последствий.

## 1. Введение

Высокий уровень неопределенности экономических и экологических результатов, которые заявляются инициаторами крупномасштабных инфраструктурных проектов, влечёт за собой необходимость моделирования данных процессов. Кроме того, основные факторы риска связаны с пересечением интересов экономических акторов различной природы (в том числе социальных групп), имеющих разный вес и обладающих разными уровнями влияния при принятии окончательных решений. В связи с этим представляет особый интерес такой инструмент имитационного моделирования, как мультиагентный подход [1–8], который позволяет не только детально представить каждого экономического актора (с его интересами, механизмами влияния на управленческие решения, особенностями поведения и др.), но и саму гетерогенную среду окружения.

Особое место в этом контексте занимает моделирование информационного пространства [9], предопределяющего аналитическую основу формирования решений акторами разной природы (экономическими, управленческими и др.). Это предопределило необходимость отдельного рассмотрения данного этапа проектирования мультиагентной системы для имитации различных вариантов реализации инфраструктурных мегапроектов.

Поскольку речь идёт о моделировании системы с обратной связью, следует подробнее рассмотреть концепцию взаимодействия агента и среды его окружения. Идея, лежащая в основе информационного взаимодействия, состоит в том, что агенты адаптируют свое поведение в зависимости от окружения. Таким образом, осуществление этой связи дает информацию о причине и следствии происходящих в системе событий, о последствиях действий агентов и о том, какую стратегию следует выбрать агентам для достижения их целей.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена по плану НИР ИЭиОПП СО РАН № АААА-А17-117022250123-0.

На данном этапе исследования была поставлена цель – охватить наиболее важные аспекты реальной проблемы, когда агент взаимодействует со своей средой.

## 2. Модель разрабатываемой МАС

Специфика выбранного метода исследования предопределяет идентификацию представительного множества акторов в качестве агентов и декомпозицию общего процесса реализации проекта на ключевые компоненты [1].

В общем случае модель разрабатываемой МАС имеет вид [2]:

$M = (V, E, I, P, Q)$ , где:

$V$  – множество различных групп агентов. На текущем этапе исследования выделены следующие типы агентов: представители высших органов власти, руководители территориальных субъектов в зоне реализации проекта, эксперты, инвесторы, подрядные организации, поставщики оборудования и общественные организации;

$E \subset V \times V$  – множество различных видов отношений между агентами (ключевых подпроцессов), например, согласование проекта ТКМ (в том числе при внесении изменений в проект), взаимодействие власти и компаний-инвесторов, проведение тендеров по отдельным этапам работ по проекту, закупка оборудования и т.д.;

$I = I_{field} \cup I_{flow}$  – окружение агентов, множество компонентов внешней информационной среды функционирования агентов – информационного пространства, которое состоит из информационных полей  $I_{field}$  и информационных потоков  $I_{flow}$ , в роли которых могут выступать, к примеру, СМИ;

$P \subset V \times I$  – множество взаимосвязей агентов и внешней среды их функционирования (восприятие агентами преобразований среды, формирование изменений в информационных потоках);

$Q \subset I \times V$  – множество взаимосвязей среды и агентов (оповещение агентов информационной средой о каком-либо событии, изменение атрибутов агентов и т.д.).

Поскольку при протекании процессов, связанных с развитием транспортной сети, информационное пространство занимает особое место (т.к. влияет на исходы взаимодействий различных участников этих процессов), рассмотрим более подробно некоторые аспекты идентификации типов агентов и проектирования окружения агентов на примере реализации крупномасштабных транспортных проектов.

## 3. Идентифицированные типы агентов

В результате декомпозиции процесса реализации проекта ТКМ через Берингов пролив на территориях Азиатской России были выявлены следующие группы агентов:

- представители федеральных министерств (агентства, службы, надзоры: Росжелдор, Росавтодор, Росприроднадзор и др.);
- структуры региональных и муниципальных органов власти автономного округа;
- компании-инвесторы (ресурсодобывающие компании, ведущие разработку в регионе) или отдельные инвесторы;
- инжиниринговые строительные организации и инженерные организации, непосредственные разработчики проектов;
- общественные организации (сообщества по защите прав коренных малочисленных народов Севера, общественная экологическая экспертиза, общественные организации природоохранного направления автономного округа, например, такие как «Умкы-патруль» и др.);
- компании-поставщики оборудования;
- подрядные организации;
- СМИ.

Но при детальном рассмотрении процесса формирования и изменения окружающей среды удобнее рассматривать эти группы агентов в качестве следующих:

- агенты-управленцы –  $V^{\sim}$ ;
- агенты- лоббисты –  $V^{\approx}$ ;
- агенты-участники информационного сопровождения проектов –  $V^{\Delta}$ .

Отметим, что между агентами разных групп ( $V^{\sim}, V^{\approx}, V^{\Delta}$ ) осуществляются взаимодействия в обоих направлениях. Концепция «многие-ко-многим» лучшим образом отражает суть процессов, которые свойственны схемам взаимодействия в реальном мире. Технически взаимодействие агентов (агентов друг с другом, агента с окружающей средой) осуществляется через передачу потоков сообщений.

Первое подмножество агентов ( $v_j^{\sim} \in V^{\sim}, [V^{\sim}] = n_1$ ) включает в себя классических агентов (агенты-управленцы), функционирующих в экономическом пространстве: руководители территориальных структур, администрация проекта сооружения транспортной магистрали, инвесторы, представители населения, общественных движений и т.п.

Второе подмножество агентов ( $v_j^{\approx} \in V^{\approx}, [V^{\approx}] = n_2$ ) состоит из агентов, которые обеспечивают лоббирование проектов на разных уровнях принятия решений, которое могут проводить как отдельные агенты-лоббисты, так и организации-лоббисты проекта.

Третье подмножество агентов ( $v_j^{\Delta} \in V^{\Delta}, [V^{\Delta}] = n_3$ ) – это группа агентов информационного сопровождения проектов, включающая в себя как отдельные подмножества агентов, так и узкоспециализированных агентов (агенты-интерпретаторы сообщений и др.).

На этапе имитации между перечисленными группами агентов возникают взаимодействия, отражающие суть процессов, протекающих в реальности. В данном случае взаимодействие агентов (как между собой, так и с окружающей средой) технически осуществляется посредством передачи сообщений.

#### 4. Построение концептуальной модели информационного пространства

В рамках разрабатываемой МАС окружение агентов ( $I$ ) – абстрактное представление агрегации различных составляющих информационного пространства (как информационных полей, так и потоков) [10, 11]. В контексте программной системы это база данных, причём под информационными полями ( $I_{field}$ ) понимаются данные, в которые не вносятся изменения агентами (базы знаний о погодных условиях региона, справочники, содержащие информацию о составе тех или иных строительных работ, информацию о существующих транспортных проектах и т.д.), а под информационными потоками ( $I_{flow}$ ) – данные, которые формируют и изменяют агенты (сообщения СМИ о событиях, связанных с реализацией проекта, сообщения иностранных СМИ, упоминания о проекте в социальных медиа, информация о ходе строительства и др.) [11]. Таким образом, в каждый момент времени один и тот же информационный поток может содержать различную информацию.

В данном случае агенты являются как потребителями, так и производителями информации, но при этом каждый тип агентов имеет доступ лишь к определённой её части, в то же время не все области информационного пространства могут быть подвержены изменениям со стороны агентов.

Как и в реальном мире, информационное пространство влияет на исход взаимодействий между различными агентами – участниками реализации проекта, поскольку может содержать как справочную информацию, на основе которой агенты принимают решения, так и срочные сообщения, к примеру, информацию о произошедшей аварии т.д.

Поскольку в некоторых случаях при формировании и восприятии информации речь идёт о субъективном взгляде на те или иные события, несвоевременности получения каких-либо сведений, а также о других влияниях человеческого фактора, было решено в некоторых случаях восприятия информации агентами искусственно внести некоторое её искажение (по аналогии с реальными процессами: агент неверно интерпретирует считанную информацию

или ошибается при её обработке). Вероятность возникновения искажений будет варьироваться [9]. Кроме того, наблюдается очевидная необходимость обеспечения мультидоступа к данным, в связи с этим ведется разработка соответствующих протоколов на основе классического подхода [12–15].

Очевидно, что для реализации концепции взаимодействия со средой агент должен в той или иной степени воспринимать состояние своего окружения и уметь совершать действия, которые влияют на состояние. Кроме того, агент также должен иметь цели или задачи, связанные с состоянием окружающей среды. Взаимодействие между активным агентом, принимающим решения, и его средой, в рамках которой агент стремится достичь цель, характеризуется как тем, что среда влияет на агента, так и тем, что действия агента могут влиять на будущее состояние окружающей среды

Правильный (наиболее выгодный) выбор решения, которое агент принимает, может в перспективе исследования потребовать «предусмотрительности», то есть планирования – принятия тех или иных решений на следующих этапах взаимодействия со средой. И наоборот, агент может использовать свой опыт для повышения своей производительности с течением времени. Знания, которые агент привносит в задачу с самого начала (либо из предыдущего опыта работы агента, либо вложенные в него путем проектирования) влияют на то, что будет представлять выгоду для агента. Взаимодействие с окружающей средой необходимо для корректировки поведения с целью использования конкретных особенностей задачи.

## **5. Формализация среды окружения при помощи марковских процессов принятия решений с конечным числом этапов**

Рассмотрим процесс взаимодействия агентов и окружающей среды: агент выбирает действия, а среда реагирует на эти действия и представляет агенту новые ситуации. С этой позиции в рамках данного исследования разрабатывается дискретная недетерминированная динамическая среда [16]. Иными словами, предполагается, что: а) агенты воспринимают события с достаточно высокой, но ограниченной точностью (информация, воспринятая агентом, может отличаться от информации, сформированной средой), поскольку имеет место искусственное искажение информации; б) в ответ на преобразование среды агент формирует неограниченное число реакций – от инициирования взаимодействия с другими агентами (или же формирования изменений в другой области информационной среды) до отсутствия какой-либо реакции; в) в момент между восприятием изменения среды и реакцией агента на это изменение информационная среда может преобразоваться вновь. Проектирование среды, обладающей данными характерными чертами, обусловлено целью достижения наибольшего сходства модели с процессами, протекающими в реальном мире.

Было решено формализовать процесс проектирования модели информационного пространства и способов взаимодействия с ним агентов, используя идеи теории динамических систем, в частности, таких как оптимальное управление марковскими процессами принятия решений [17]. Для этого необходимо охватить наиболее важные аспекты реальной проблемы, с которой сталкивается агент, взаимодействующий во времени со своей средой для достижения цели.

Агент должен в некоторой степени ощущать состояние своего окружения и уметь предпринимать действия, которые влияют на состояние среды, посредством сенсоров и эффекторов. Сенсоры – это абстракция, описывающая своего рода «датчики» для восприятия окружающей среды, а «эффекторы» – исполнительные органы, которые изменяют среду (реагируют на различного рода события). Важной задачей также является определение способов восприятия агентами изменений информационной среды (и обратно).

Агент также должен иметь цели или задачи, связанные с состоянием окружающей среды. Марковские процессы принятия решений призваны включать только эти три аспекта – ощущение, действие и цель – в их простейших возможных формах, но не упрощая излишне ни один из них. Цель агента в данном случае – специальный сигнал, называемый

вознаграждением, дающимся средой агенту. На каждом временном шаге награда – это число  $R_t \in R$ . Основная цель агента – максимизировать общую сумму вознаграждения, которое он получает с течением времени посредством выбора действий (рис. 1).

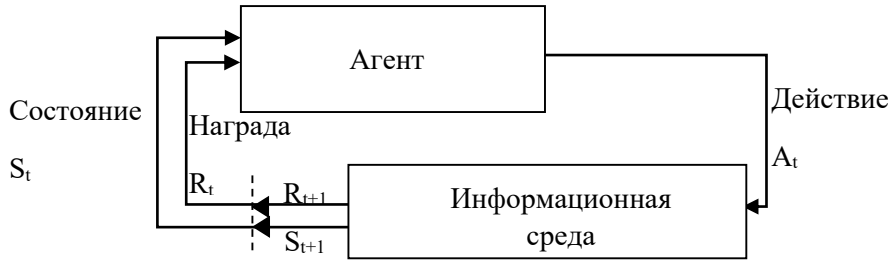


Рис. 1. Взаимодействие агента и среды в марковском процессе принятия решений

Введём формально проблему конечных марковских процессов принятия решений применительно к поставленной задаче. Эта проблема включает в себя ассоциативный аспект – выбор различных действий в различных ситуациях. Классическая формализация последовательного принятия решений соответствует тем случаям, когда действия влияют не только на немедленные награды, но и на последующие ситуации. Таким образом, марковские процессы принятия решений учитывают отложенное (задержанное) вознаграждение и необходимость компромисса немедленного и отложенного вознаграждения.

Агент и среда взаимодействуют на каждом из последовательных шагов дискретного времени  $t = 0, 1, 2, 3, \dots$ . На каждом временном шаге  $t$  агент получает некоторое представление о состоянии среды  $S_t \in S$  и на этом основании выбирает действие  $A_t \in A(s)$ , где  $A(s)$  – набор действий. На данном этапе проектирования примем допущение, что  $A(s)$  одинаков во всех состояниях. На следующем шаге времени в результате выбора своего действия агент получает числовое вознаграждение  $R_{t+1} \in R \subset \mathbb{R}$  и попадает в новое состояние  $S_{t+1}$ .

Таким образом, можно описать процесс при помощи последовательности, которая начинается следующим образом:

$$S_0, A_0, R_1, S_1, A_1, R_2, S_2, A_2, R_3, \dots$$

В конечном марковском процессе принятия решений наборы состояний, действий и вознаграждений ( $S$ ,  $A$  и  $R$ ) имеют конечное число элементов. В этом случае случайные величины  $R_t$  и  $S_t$  имеют четко определенные распределения вероятностей, зависящие только от предшествующего состояния и действия. То есть для конкретных значений этих случайных величин  $s' \in S$  и  $r \in R$  существует вероятность того, что эти значения будут заданы в момент времени  $t$  при определенных значениях предыдущего состояния и действия, которую можно вычислить при помощи функции  $p$ :

$$p(s', r | s, a) = Pr \{S_t = s', R_t = r | S_{t-1} = s, A_{t-1} = a\}, \forall s', s \in S, r \in R \text{ и } a \in A(s).$$

Это определение функции  $p: S \times R \times S \times A \rightarrow [0, 1]$ , которая является обычной детерминированной функцией от четырех аргументов,  $p$  задает распределение вероятностей для каждого выбора  $s$  и  $a$ , то есть:

$$\sum_{s' \in S} \sum_{r \in R} p(s', r | s, a) = 1 \quad \forall s \in S, a \in A(s).$$

Вероятности, задаваемые функцией  $p$ , полностью характеризуют динамику конечного марковского процесса принятия решений. Исходя из этого, можно вычислить все, что можно знать об окружающей среде, например, вероятности перехода состояний (которые обозначим по определению как функцию  $p$  от трех элементов,  $p: S \times S \times A \rightarrow [0, 1]$ ):

$$p(s' | s, a) = Pr \{S_t = s' | S_{t-1} = s, A_{t-1} = a\} = \sum_{r \in R} p(s', r | s, a).$$

Мы также можем вычислить ожидаемое вознаграждение для пар состояние – действие в виде функции  $r$  с двумя аргументами  $r: S \times A \rightarrow \mathbb{R}$ :

$$r(s, a) = E [R_t | S_{t-1} = s, A_{t-1} = a] = \sum_{r \in R} r \sum_{s' \in S} p(s', r | s, a)$$

или же вычислить ожидаемое вознаграждение для троек состояние – действие – следующее состояние при помощи функции  $r$  от трёх аргументов:

$$r(s, a, s') = E [R_t | S_{t-1} = s, A_{t-1} = a, S_t = s'] = \sum_{r \in R} r \frac{p(s', r | s, a)}{p(s' | s, a)}.$$

Структура марковского процесса принятия решений является абстрактной, гибкой, а значит, может быть применена не только к поставленной задаче, но и ко многим другим проблемам различными способами. Общее правило, которого необходимо придерживаться, заключается в том, что все, что не может быть произвольно изменено агентом, считается находящимся вне его и, следовательно, является частью его среды. При этом агент может обладать некоторыми знаниями о том, как вычисляется его вознаграждение. Но осуществление процесса вычисления вознаграждения всегда должно быть внешним по отношению к агенту, поскольку это определяет задачу, стоящую перед агентом, и, следовательно, не может произвольно меняться. Фактически в некоторых случаях агент может знать все о том, как работает его среда, если это необходимо.

## 6. Заключение

На данном этапе исследования предложен прототип мультиагентной системы для моделирования процессов, сопряженных с реализацией транспортных мегапроектов. Особое внимание уделено описанию информационной среды функционирования агентов как ключевому элементу мультиагентной системы – это модель окружающей среды, которая имитирует формирование и изменение информационного пространства. Определён состав способов формирования и изменения её компонентов агентами и обратно, методов воздействия среды на агентов на основе теории конечного марковского процесса принятия решений.

В перспективе стоит задача уточнения агентной модели: состава агентов, алгоритмов их взаимодействия, развития топологии МАС, а также усовершенствования прототипа разрабатываемой информационной среды. Кроме того, представляется необходимой разработка коммуникационных протоколов для организации корректного взаимодействия агентов и их общего информационного пространства.

## Литература

1. *Лычкина Н. Н.* Информационные системы управления производственной компанией: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Изд. Юрайт, 2018.
2. *Жмурко С. А.* Обобщенная модель агента и многоагентной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 4.
3. *Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В.* Многоагентные системы // Новости искусств. интеллекта. 1998. № 2. С. 64–116.
4. *Хорошевский В. Ф.* Методы и средства проектирования и реализации мультиагентных систем // Матер. семинара «Проблемы искусственного интеллекта», ИПУ РАН, 1999.
5. *Маслобоев А. В.* Механизмы взаимодействия и координации агентов в открытой мультиагентной системе информационной поддержки региональных инновационных структур // Теория и практика системной динамики: труды II-ой Всерос. науч. конф., Апатиты, КНЦ РАН, 2007.

6. *Маслобоев А. В.* Мультиагентная технология информационной поддержки инновационной деятельности в регионе. Прикладные проблемы управления макросистемами // Труды Института системного анализа РАН. 2009. Т. 39.
7. *Замятина Е. Б.* Современные теории имитационного моделирования: специальный курс. Пермь: ПГУ, 2007.
8. *Аристов С. А.* Имитационное моделирование экономических процессов: учебное пособие. Екатеринбург, 2003.
9. *Пантелеев М. Г., Кохтенко Н. В., Лебедев С. В.* Среда имитационного моделирования агентных систем реального времени // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1 (77).
10. *Чайковский Д. В.* Информационное пространство: анализ определений // Вестник БГУ. 2010. № 14.
11. *Манойло А. В.* Государственная информационная политика в особых условиях: монография. М.: МИФИ, 2003.
12. *Дейт К. Дж.* Введение в системы баз данных. 7-е издание. М.: Изд. «Вильямс», 2001.
13. *Гарсиа-Молина Г., Ульман Д. Д., Уидом Д.* Системы баз данных. Полный курс. М.: Изд. «Вильямс», 2003.
14. *Малыхина М. П.* Базы данных: основы, проектирование, использование. СПб.: БХВ-Петербург, 2004.
15. *Дуго С. М.* Базы данных: проектирование и использование: учебное пособие для вузов. М.: Финансы и статистика, 2005.
16. *Девятков В. В.* Системы искусственного интеллекта: учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
17. *Richard S. Sutton, Andrew G. Barto* Reinforcement Learning: An Introduction. The MIT Press Cambridge, Massachusetts.

*Статья поступила в редакцию 31.07.2019;  
переработанный вариант – 02.09.2019.*

**Есикова Татьяна Николаевна**

к.э.н., ведущий научный сотрудник ИЭиОПП СО РАН (630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 17), тел. (383) 330-25-96, e-mail: T.N.Yesikova@gmail.com.

**Вахрушева Светлана Витальевна**

аспирант НГУ (630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1), e-mail: s.vakhr@gmail.com.

**Agent environment simulation while developing multi-agent system with large-scale infrastructure projects serving as an example**

**T. Yesikova, S. Vakhrusheva**

The article poses the problem of simulation processes associated with the construction of large-scale infrastructural projects in the context of the Bering Strait tunnel. The research is based on such a simulation method as a multi-agent modeling. The article describes the basics of building a multi-agent system environment in relation to this task. It contains description of the environment interactions and identified agents.

*Keywords:* large-scale infrastructural projects, simulation modelling, multi-agent system (MAS), agents, interaction environment, MAS architecture.