

УДК 681.3, 681.5

Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом

А.В. Маслобоев

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН, лаборатория региональных информационных систем, Апатиты

Аннотация. Разработаны научно-методические основы интеграции мультиагентных технологий и методов системной динамики. Рассмотрена обобщенная модель деятельности интеллектуальных агентов субъектов инновационной деятельности в виртуальной бизнес-среде. Проведен обзор существующих архитектур агентов. Разработана гибридная InteRRap-архитектура интеллектуального агента с внутренней подсистемой имитационного моделирования, представляющей собой имитационный аппарат (комплекс системно-динамических моделей). Предложены подходы реализации имитационного аппарата агентов на основе системно-динамических моделей в мультиагентной среде.

Abstract. The scientific-methodical foundations of multi-agent technologies and system dynamics methods integration have been developed. The generalized intelligent agent activity model in the virtual business environment of innovation evolution has been considered. The survey of existent agent architectures has been represented. The hybrid intelligent agent architecture with internal simulation subsystem constituting a simulation engine (a complex of system-dynamic models) has been designed. Implementation approaches to agent simulation engine based on system-dynamic models in the multi-agent environment have been proposed.

1. Введение

Мурманская область располагает значительным инновационным потенциалом. Здесь имеется много научно-исследовательских организаций, ведущих фундаментальные и прикладные исследования в различных отраслях знаний. Результаты этих работ в настоящее время используются недостаточно полно. Одним из барьеров на их пути является отсутствие механизма формирования инновационных структур, призванных реализовывать бизнес-проекты по коммерциализации результатов научных исследований и разработок, т.е. доводить их до логического завершения – создания инноваций.

Региональные инновационные процессы специфичны в силу ряда причин: 1) большой объем разнородной информации, ассоциированной с инновационными процессами; 2) большая территориальная распределенность компонентов инновационных структур; 3) динамичность структуры инновационного поля; 4) организационная неоднородность элементов инновационного поля, существенным образом ограничивающая применимость методов и технологий, апробированных и хорошо себя зарекомендовавших в корпоративных информационных системах.

Поиск потенциальных бизнес-партнеров для реализации инновационного проекта, по существу, заключается в переборе имеющихся инновационных предложений и выборе среди них подходящих по заданным критериям. Современные технологии и прикладные программные системы российских и зарубежных разработчиков недостаточно эффективно решают подобные задачи информационного обеспечения инновационной деятельности.

Для повышения эффективности информационного обеспечения регионального инновационного развития в ИИММ КНЦ РАН разработана мультиагентная технология информационной поддержки инновационной деятельности, обеспечивающая формирование и оценку потенциально эффективных инновационных структур. В рамках технологии осуществляется интеграция и автоматизированная децентрализованная обработка распределенных информационных ресурсов инноваций на базе взаимодействия программных агентов, имеющих гибридную архитектуру. Технология реализована в рамках прототипа открытой мультиагентной системы интеграции распределенных информационных ресурсов инноваций (Маслобоев, Шишаев, 2007), представляющей собой комплекс программных агентов, функционирующих в сети Интернет.

В статье рассматривается обобщенная модель деятельности интеллектуальных агентов в виртуальной бизнес-среде, представленная в виде многослойной семантической сети, ядром которой является четырехуровневая схема развертывания деятельности: "деятельность → ситуация → действие → операция". В отличие от принятой в информатике модели деятельности типа "черного ящика", эта четырехуровневая

модель может рассматриваться как "прозрачный ящик". В ней раскрываются внутренние механизмы деятельности путем анализа подсистем представления (моделирования внешней среды) и опыта, поведения (внешней регуляции) и интенциональной подсистемы (саморегуляции). Приводится описание гибридной архитектуры интеллектуального агента с имитационным аппаратом, представляющей собой расширенную комбинацию общепринятых реактивной и InteRRap архитектур интеллектуальных агентов М. Барбучеану и М. Фокса. С помощью интегрированной в структуру агента подсистемы имитационного моделирования агент способен строить внутри себя модели внешнего мира и модели поведения других агентов для прогнозирования развития среды и планирования своих действий. Предлагаются подходы реализации имитационного аппарата агентов на основе системно-динамических моделей в мультиагентной среде.

2. Постановка задачи

Проблема информационного обеспечения инновационной деятельности является актуальной и требует разработки принципиально новых подходов для ее решения, базирующихся на применении передовых информационных технологий и математического моделирования. Одним из путей решения задачи информационной поддержки инноваций является создание проблемно-ориентированных компьютеризированных систем имитационного моделирования бизнес-процессов, образующих в комплексе систему информационной поддержки инновационной деятельности. Распределенность и динамичность вовлеченных в инновационные процессы ресурсов и субъектов экономической деятельности мотивирует к использованию при построении систем информационной поддержки инноваций децентрализованных архитектур и соответствующих технологий.

Виртуальная бизнес-среда развития инноваций, в которой функционируют про-активные агенты субъектов региональных бизнес-сообществ, является не только пространственно распределенной, но и обладает внутренней динамикой. Причем эта динамика является различной для разных компонентов среды. Интеллектуальные агенты, обладая развитым внутренним представлением сцены и возможностями рассуждений, должны быть способны запоминать и анализировать различные ситуации на рынке для информационной поддержки принятия решений при выборе агентом бизнес-партнеров или формировании бизнес-структур, прогнозировать риски и экономический эффект от вложений в инновации, предвидеть возможные реакции на свои действия, делать из этого выводы, полезные для дальнейших действий, и в результате прогнозировать свое будущее и изменения сцены. Для того чтобы учесть все эти особенности, агенты субъектов региональных бизнес-сообществ должны быть снабжены имитационным аппаратом. Имитационный аппарат представляет собой полную или упрощенную модель среды, в которой функционирует агент, рекуррентно вызываемую в процессе моделирования. В качестве средства реализации этого аппарата в работе предлагается использовать системно-динамические модели.

3. Методологические основы исследования

Для решения поставленной в работе задачи использованы методы концептуального моделирования, методы имитационного моделирования, методы искусственного интеллекта, методы распределенных вычислений, теории формальных грамматик и языков.

Исследования, представленные в статье, базируются на работах отечественных и зарубежных ученых: Г.С. Пospelова, Д.А. Пospelова, В.Ф. Венды, В.М. Курейчика, В.В. Курейчика и В.Б. Тарасова – в области человеко-машинных систем и искусственного интеллекта; В.И. Городецкого, В.Ф. Хорошевского, Р. Мандье, К. Кольски, И. Демазо, С.А. Делоча – в области многоагентных систем; Д.А. Новикова, Ю.А. Загорулько, Г.А. Унтура, В.А. Филиппова, А.А. Иващенко – в области информационного обеспечения инновационной деятельности; П.О. Скобелева, В.А. Виттиха, Ю.Г. Карпова, И.Г. Пospelова и П.А. Миллинга – в области имитационного моделирования экономических структур; А.П. Еремеева, В.Н. Вагина, Е.Ю. Головиной, Э.В. Попова – в области интеллектуальных систем.

Для реализации разрабатываемой системы информационной поддержки региональных инноваций выбрана технология мультиагентных систем (Тарасов, 2002), в рамках которой субъекты инновационной деятельности представляются в виде программных агентов, функционирующих и взаимодействующих друг с другом в едином информационном пространстве (виртуальной бизнес-среде) в интересах своих владельцев, образуя открытую мультиагентную систему с децентрализованной архитектурой.

4. Концептуальная модель интеллектуального агента

В настоящей работе под агентом будет пониматься самостоятельная интеллектуальная система, имеющая возможность принимать воздействие от внешнего мира и от себе подобных, определять свою реакцию на это воздействие и осуществлять эту реакцию, а также действующую либо от лица пользователя, либо от лица системы, делегировавшей агенту полномочия на выполнение тех или иных действий.

Основным отличием агентов от систем в целом является активность, то есть возможность самостоятельно выполнять какие-либо действия. Кроме того, агент обычно рассматривается не как совокупность частей, а как единая сущность, тогда как, например, при исследовании свойств систем первый подход является основным. Еще одной отличительной характеристикой является то, что агент может быть воплощен не в виде некоторого материального объекта, а существовать как самостоятельная программа. При этом данная программа, не воздействуя на материальный мир (оставаясь в рамках компьютера или компьютерных систем), может осуществлять полезные действия.

К агентам предъявляются следующие основные характеристические требования (Городецкий, 1998):

- *Автономность.* Агент способен функционировать без прямого вмешательства человека, самостоятельно отслеживая состояние окружающей среды и собственных параметров.
- *Реактивность.* Агент способен воспринимать окружающую среду и адекватно на нее реагировать.
- *Про-активность.* Агент обладает целенаправленным поведением и может проявлять инициативу.

Кроме того, для исполнения тех или иных задач агенты должны отвечать дополнительным классифицирующим требованиям (Тарасов, 2002):

- *Способность общения.* Агент должен иметь возможность общаться и взаимодействовать с другими агентами или людьми.
- *Моделирование ситуации.* Способность агента промоделировать развитие ситуации, предсказать ход ее развития.
- *Мобильность.* Агент должен иметь возможность менять свое положение в окружающей среде.
- *Интеллектуальность.* Агент должен иметь возможность проводить логический вывод для принятия решения о своих дальнейших действиях.
- *Привязка к среде.* Агент должен существовать в определенной окружающей среде (реальной или виртуальной).

Агенты в концептуальной модели виртуальной бизнес-среды развития инноваций, подробно описанной в работе (Маслобоев и др., 2007), представляют интересы субъектов инноваций S и характеризуются множеством инновационных предложений – BI , которые они представляют в виртуальной среде, множеством базовых организационных структур – ORG^A , соответствующих конкретным функциям (ролям) агентов, и внутренней структурой – C^A , описывающей функциональное устройство агента:

$$A = \{S, BI, ORG^A, C^A\}.$$

Организационная структура агента формально описывается в виде:

$$ORG^A = \langle G^A, RL^A, CP^A, ACT^A, STR^A, L, ST, SL, T \rangle,$$

где G^A – дерево целей агента, которые он должен достичь для решения поставленной перед ним задачи; RL^A – множество ролей агента, в которых он должен выступать для достижения соответствующих целей; CP^A – множество навыков и способностей агента, которыми он должен обладать для исполнения соответствующей роли; ACT^A – множество действий; STR^A – множество стратегий поведения агента в направлении достижения соответствующих целей, причем $G^A \equiv G^S$, $RL^A \equiv RL^S$, $CP^A \equiv CP^S$, $ACT^A \equiv ACT^S$ и $STR^A \equiv STR^S$; L – множество языков; ST – множество состояний агента; SL – множество законов (правил) и ограничений функционирования агента, причем ограничение задается парой $\langle act, \varphi \rangle$, закон sl есть множество ограничений $\langle act_i, \varphi_i \rangle$, $act_i \in ACT$, $\varphi_i \in L$, $st \neq \varphi$; T – обобщенная функция переходов $T: ST \times ACT \times SL \rightarrow 2^{ST}$, удовлетворяющая следующим условиям: а) для любых $st \in ST$, $act \in ACT$, $sl \in SL$, если состояние st удовлетворяет ограничению φ , $st \neq \varphi$, и пара $\langle act, \varphi \rangle \in sl$, то $T \langle st, act, sl \rangle = \varphi$; б) для любых $st \in ST$, $act \in ACT$, $sl_1, sl_2 \in SL$, если $sl_1 > sl_2$, то $T \langle st, act, sl_1 \rangle \subseteq T \langle st, act, sl_2 \rangle$.

Все агенты системы используют для взаимодействия друг с другом и построения общих и локальных планов действий иерархическую систему языков.

$$L = \langle L_0, L_1, L_2 \rangle,$$

где L_2 – языки составления общих планов и взаимодействия с другими агентами; L_1 – языки локального планирования, предназначенные для построения плана действий агента; L_0 – языки исполнительного уровня (определяются используемыми сетевыми сервисами);

$$L_2 = \langle L_2^S, L_2^A \rangle,$$

где L_2^S – язык взаимодействия участников бизнес-процессов, а L_2^A – язык взаимодействия участников бизнес-процессов и их агентов;

$$L_2^A = \langle cmd, rep, lang \rangle,$$

где cmd – язык запросов (управления агентом), rep – форматированные результаты работы, $lang$ – язык взаимодействия агентов (ACL – *agent communication language*);

Ключевым внешним языком разрабатываемой системы является L_2^A – язык взаимодействия естественных и искусственных агентов. Базовым для реализации отдельного программного агента является язык L_1 .

Внутренняя структура агента, описывающая его функциональное устройство, описывается в виде: $S^A = (K, M, P, R, I, C)$, где K – ментальная подсистема; M – подсистема моделирования; P – подсистема анализа и планирования; R – реактивная подсистема; I – подсистема координации и взаимодействия; C – подсистема коммуникаций. Подробное описание внутренней структуры агента представлено в работах (Маслобоев и др., 2007) и (Шишаев и др., 2007).

5. Обобщенная модель деятельности интеллектуальных агентов в виртуальной бизнес-среде

Центральной задачей является исследование функциональной структуры и динамики деятельности агентов субъектов инноваций в виртуальной бизнес-среде. Здесь обычная, принятая в информатике модель деятельности типа "черного ящика" оказывается недостаточной. В интересах построения и обоснования архитектур агентов как виртуальных деятелей необходимы исследования общих принципов и внутренних механизмов деятельности, что предполагает разработку обобщенной схемы деятельности как сложной, автономной, самоорганизующейся системы.

Вариант общей модели деятельности агента представлен на рис. 1 в виде многослойной семантической сети. Ядром этой модели является четырехуровневая схема развертывания деятельности: "деятельность → ситуация → действие → операция" (в отличие от трехуровневой модели А.Н. Леонтьева).

В данной модели на каждом уровне отражаются как радиальные связи (от периферии к центру) между регулятивными (в частности, интенциональными и поведенческими) и морфологическими компонентами деятельности, так и кольцевые связи между базовыми функциями организации деятельности. В общем случае можно указать, что:

- Деятельность** = F (среда, потребности, мотивации, планирование, знания);
- Ситуация** = S (деятельность, обстоятельства, желания, моделирование, убеждения);
- Действие** = G (ситуация, объекты, цели, стратегии, умения);
- Операция** = H (действие, условия, задачи, тактики, навыки),

где F, S, G и H – отношения полиморфизма ("один-ко-многим").

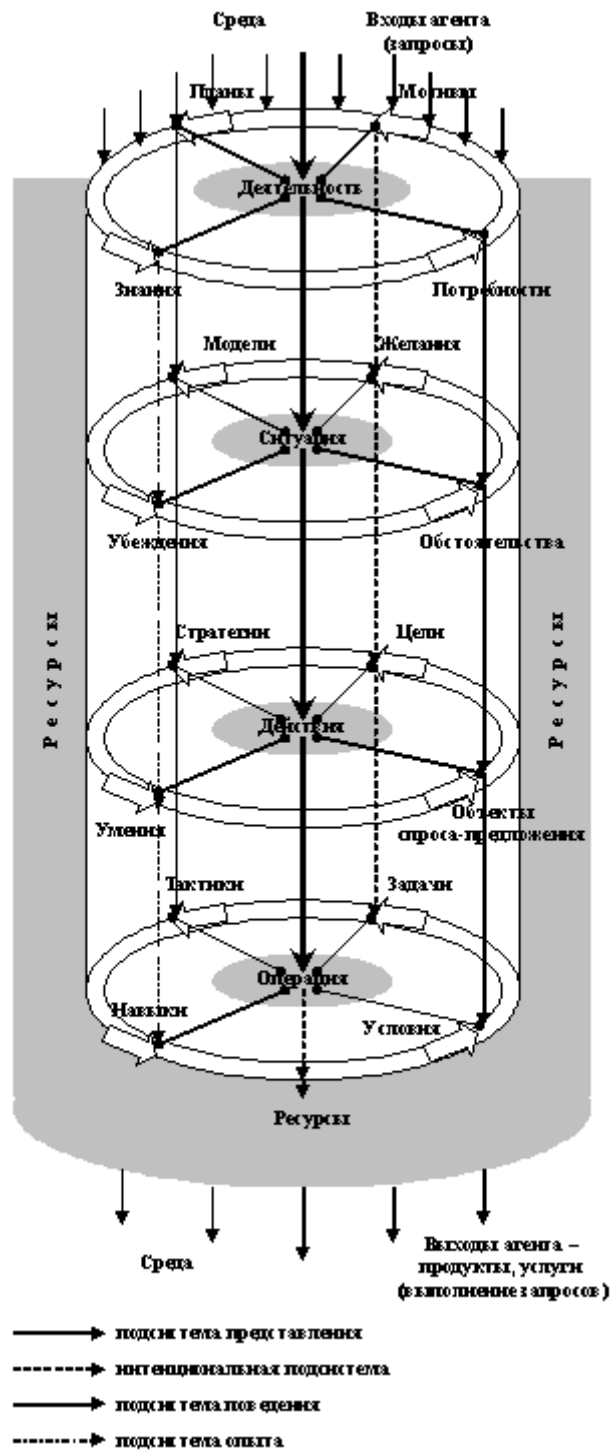


Рис. 1. Обобщенная модель деятельности агента

В отличие от представления деятельности типа "черного ящика", эта четырехуровневая модель может рассматриваться как "прозрачный ящик". В ней раскрываются внутренние механизмы деятельности путем анализа подсистем представления (моделирования внешней среды) и опыта, поведения (внешней регуляции) и интенциональной подсистемы (саморегуляции). Анализ деятельности можно проводить на основе как вертикальных отношений "мотивы – желания – цели – задачи", "планы – модели – стратегии – реакции", так и горизонтальных отношений "потребности – мотивы – планы – знания", "объекты удовлетворения потребностей – цели – стратегии – умения", "условия – задачи – тактики – навыки", определяющих автономные контуры самоорганизации (по Б.Г. Ананьеву). Соответственно, понятие агента как деятеля можно определить в зависимости от выбранного (или технически достижимого) уровня антропоморфизма неким подмножеством из указанного набора характеристик деятельности. Так, на верхнем уровне интерпретируемые интеллектуальными агентами потребности формируют сферу мотивации, а построение планов реализации мотивов требует пополнения знаний или пересмотра убеждений агента моделированием характеристик нижнего уровня и их связей с функциями среднего уровня.

6. Краткий обзор существующих архитектур агентов

Существующие архитектуры агентов можно классифицировать следующим образом:

- Архитектуры, базирующиеся на принципах и методах ИИ (deliberative agent architectures).
- Реактивные архитектуры, основанные на поведении и на реакции на события внешнего мира (reactive agent architectures).
- Гибридные многоуровневые архитектуры, основанные на поведении и методах ИИ (hybrid agent architectures).

Главным требованием к архитектуре агента субъекта инноваций в контексте решаемой в работе задачи является наличие подсистемы моделирования, необходимой агенту для построения сценариев собственного развития, развития агентов-конкурентов и развития внешней среды, на основании которых агент определяет свое поведение в настоящем и будущем, а также прогнозирует экономическую эффективность инновационных проектов. Рассмотрим существующие архитектуры агентов более подробно с точки зрения описанного выше требования.

Архитектуры, основанные на знаниях

Организация архитектуры агентов на принципах искусственного интеллекта (ИИ) имеет преимущества с точки зрения удобства использования методов и средств символического представления знаний, разработанных в рамках искусственного интеллекта. Но, в то же время, создание точной и полной модели представления мира, процессов и механизмов рассуждения в нем представляют здесь существенные трудности.

К архитектурам данного типа относятся: архитектура на основе производственной системы, архитектура на основе классификаторов, архитектура с иерархической базой знаний, архитектура Барбучеану-Фокса и др. Основным достоинством перечисленных выше архитектур агентов является наличие развитой ментальной подсистемы, образующей интеллектуальную составляющую агента. Основным недостатком является отсутствие подсистемы моделирования, как необходимого средства для прогнозирования своего поведения, себе подобных и внешнего мира.

Реактивные архитектуры

Принципы реактивной архитектуры возникли как альтернативный подход к архитектуре интеллектуальных агентов. Идея реактивных агентов впервые возникла в работах Брукса, выдвинувшего тезис, что интеллектуальное поведение может быть реализовано без символического представления знаний, принятого в классическом ИИ. Реактивными называются агенты и архитектуры, где нет детально представленной модели мира, а функционирование отдельных агентов и всей системы осуществляется по правилам типа ситуация – действие. При этом под ситуацией понимается потенциально сложная комбинация внутренних и внешних состояний.

К архитектурам данного типа относятся: коннекционистская архитектура, архитектура "соподчинения" и др. Основным достоинством перечисленных выше архитектур агентов является наличие развитой подсистемы анализа и планирования поведения и действий агента, реактивной подсистемы, определяющей реакции агента на внешние события, а также подсистемы организации кооперативного поведения агентов. Основным недостатком является отсутствие подсистем моделирования и прогнозирования, а также ментальной подсистемы.

Гибридные архитектуры

Гибридные архитектуры (Маслобоев и др., 2006) объединяют в себе все достоинства реактивных архитектур агентов и архитектур, основанных на знаниях. Основным же недостатком является отсутствие подсистемы моделирования. Наиболее близкими к требуемой для решения поставленной в

работе задачи архитектуре агента субъекта инноваций являются InteRRap-архитектура и архитектура Touring Machine. Но они требуют существенной модификации, касающейся разработки механизма включения в их функциональную структуру имитационного аппарата и механизма связывания его с другими архитектурными компонентами для обеспечения совместимости и надежной работы агента. Гибридные архитектуры позволяют гибко комбинировать возможности всех подходов. Вот почему в последнее время явно прослеживается тенденция разработки и использования именно гибридных агентных архитектур и систем агентов.

К архитектурам данного типа относятся: WILL-архитектура, InteRRap-архитектура, архитектура Touring Machine, IDS-архитектура, композиционная архитектура и др.

Результаты сравнительного анализа архитектур агентов приведены в таблице. На основании проведенного обзора было выявлено, что ни одна из рассмотренных агентных архитектур не обладает требуемой функциональностью для решения поставленной в работе задачи. Ни одна из перечисленных архитектур гибридного типа не позволяет удовлетворить рассмотренные выше специфические требования, предъявляемые как к системам информационной поддержки инноваций, так и к региональным бизнес-структурам, не имеющим в своей основе внутренней моделирующей подсистемы. Ниже будет рассмотрена разработанная гибридная InteRRap-архитектура интеллектуального агента, включающая в себя имитационный аппарат – *Simulation-based Agent Architecture (SAA)*.

Таблица. Сравнительный анализ архитектур агентов

Компоненты архитектуры агента	Подсистемы							
	распределения информации	моделирования	координации и взаимодействия	коммуникации с другими агентами	анализа и планирования	реактивная	организации кооперативного поведения	ментальная
1. Архитектуры, базирующиеся на принципах и методах ИИ (<i>deliberative agent architectures</i>)								
Архитектура на основе производственной системы	+	-	-	+	-	-	-	+
Архитектура на основе классификаторов	-	-	-	+	-	-	-	+
Архитектура с иерархической БЗ	+	-	+	+	-	-	-	+
Архитектура Барбучеану-Фокса	+	-	+	+	+	+	+	+
2. Реактивные архитектуры, основанные на поведении и на реакции на события внешнего мира (<i>reactive agent architectures</i>)								
Коннекционистская архитектура	-	-	-	+	-	+	+	-
Архитектура "соподчинения"	-	-	-	+	-	+	+	-
3. Гибридные многоуровневые архитектуры, основанные на поведении и методах ИИ (<i>hybrid agent architectures</i>)								
WILL-архитектура	-	-	+	+	+	+	-	+
InteRRap-архитектура	+	-	+	+	+	+	+	+
Архитектура Touring Machine	-	-	+	+	+	+	-	+
IDS-архитектура	-	-	-	+	+	+	-	+
Композиционная архитектура	-	-	+	+	+	+	-	+

7. Функциональная модель интеллектуального агента с имитационным аппаратом (*Simulation-based Agent Architecture*)

Предлагаемая гибридная архитектура агентов представляет собой расширение существующей гибридной InteRRap-архитектуры агента за счет добавления в ее состав подсистемы имитационного моделирования, представляющей собой имитационный аппарат (комплекс системно-динамических моделей), с помощью которого агенты становятся способными имитировать сценарии развития отдельных взятых инновационных проектов, поведение компаньонов и конкурентов на рынке инновационных услуг и на основе результатов моделирования прогнозировать риски и экономический эффект от капиталовложений в инновации.

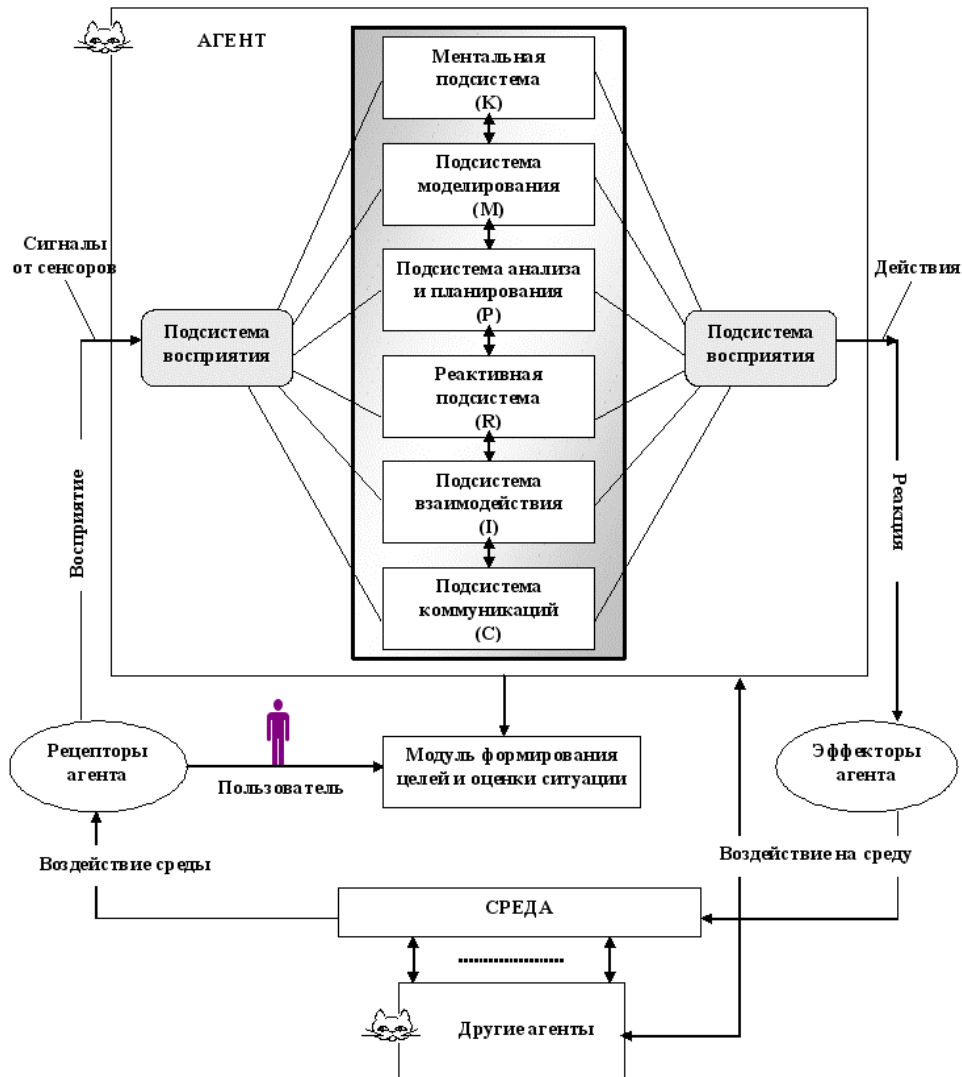


Рис. 2. Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом

В качестве средства реализации имитационного аппарата предлагается использовать системно-динамические модели. Данная подсистема моделирует поведение объектов внешней среды и самого агента, что используется для объяснения текущего поведения и предсказания возможного поведения в будущем. Имитационный аппарат представляет собой полную или упрощенную модель среды, в которой функционирует агент, рекуррентно вызываемую в процессе моделирования.

Общий вид гибридной архитектуры интеллектуального агента с имитационным аппаратом представлен на рис. 2. К ее основным архитектурным компонентам относятся: ментальная подсистема, подсистема моделирования, подсистема анализа и планирования, реактивная подсистема, подсистемы коммуникации и взаимодействия.

Внутренняя структура агента, описывающая его функциональное устройство, описывается в виде: $C^A = (K, M, P, R, I, C)$, где K – ментальная подсистема; M – подсистема моделирования; P – подсистема анализа и планирования; R – реактивная подсистема; I – подсистема координации и взаимодействия; C – подсистема коммуникаций.

Ментальная подсистема (К) ("Интеллект") реализуется с помощью языка KIF (Knowledge Interchange Format) и интерпретируется как интеллектуальная, основанная на знаниях, часть автономного агента, его "Мозг" или "Интеллект". Воспринимаемая агентом информация обобщается и редуцируется подсистемой восприятия и передается на обработку ментальной подсистеме. База знаний (БЗ) агента основана на продукционной модели представления знаний. Для реализации продукционной БЗ используются три модуля: 1) БД, содержащая факты, данные и т.п.; 2) система продукций, записанная на условном языке; 3) интерпретатор, обрабатывающий продукции. База знаний агента, имеющая трехуровневую структуру, строится по принципу доски объявлений. Уровни базы знаний фактически

отвечают уровням абстракции знаний в соответствии со структурой управляющих компонентов. Ядро агента, а именно: подсистемы управления памятью, база знаний и т.д. разрабатываются на языке Java, поскольку необходимо обеспечить способность агента к мигрированию по сети.

Подсистема имитационного моделирования (М) ("имитационный аппарат"), обеспечивающая для агента локальный прогноз результата его потенциальной активности, представляет собой полную или упрощенную модель среды, в которой функционирует агент, рекуррентно вызываемую в процессе моделирования. В качестве средства реализации имитационного аппарата в работе используются системно-динамические модели. Данная подсистема моделирует поведение объектов внешней среды и самого агента, что используется для объяснения текущего поведения и предсказания возможного поведения в будущем.

Подсистема анализа и планирования действий (Р), а также *Реактивная подсистема (R)* реализуются с помощью стандартных языков описания поведения агентов – алгебры действий и алгебры поведений. *Подсистема анализа и планирования* генерирует, исполняет и реконструирует частичные планы действий агента, а также содержит механизм планирования, позволяющий строить локальные планы агента, т.е. планы, не связанные с кооперативным поведением. План представляется в виде графа, узлами которого могут быть либо конкретные наборы действий вплоть до элементарных шагов поведения, либо новые субпланы, подлежащие дальнейшей конкретизации. Таким образом, планирующая компонента активизирует поведение (через нижележащую компоненту), направляемое целями. Она же участвует и в планировании, связанном с кооперативным поведением агентов. Эта компонента может использовать знания двух нижних уровней абстракции. *Реактивная подсистема* определяет способность агента оперативно реагировать на события внешнего мира, а также события, выделяемые подсистемой анализа и планирования, даже если они ранее не планировались. Реактивная подсистема использует базовые возможности агента по реактивному поведению, а также частично использует знания агента процедурного характера. Она базируется на понятии "фрагмента поведения" как некоторой заготовки реакции агента на некоторые стандартные ситуации. Это позволяет агенту в стандартных ситуациях не обращаться к планированию на основе знаний и реализовывать значительную часть своего поведения рутинным образом с высокой эффективностью. Из базы знаний ей доступны только знания нижнего уровня абстракции, где содержится информация о фрагментах поведения.

Подсистема коммуникаций (С) и подсистема межагентного взаимодействия (I) реализуются посредством языка ACL (Agent Communication Language), опирающегося на теорию речевых актов, который поддерживает декларативный подход к передаче знаний.

Рецепторы – это сенсоры агента, отвечающие за восприятие агентом информации, получаемой из внешнего мира (среды, в которой функционируют агенты системы) и от других агентов.

Эффекторы – сенсоры агента, посредством которых агент воздействует на внешний мир (например, изменяя параметры среды) и на других агентов, посылая им сообщения разного содержания.

Среда – это виртуальный мир, в котором функционирует агент, взаимодействующий с другими агентами системы, связанный с реальным (внешним) миром.

Развернутое представление архитектуры агента с имитационным аппаратом приведено на рис. 3. Опишем ниже основные архитектурные элементы, из которых состоят вышеописанные подсистемы.

Подсистема распределения информации должна распределять релевантную информацию между агентами (по их запросу или без него); в этой подсистеме должны быть реализованы функции корректировки убеждений агентов, а также возможности дедуктивной обработки знаний.

Подсистема управления знаниями, опирающаяся на дескриптивную логику, обеспечивает темпоральные (временные) рассуждения и некоторые другие механизмы обработки. Три уровня знаний, играющих ключевую роль в архитектуре агента:

- *Знания предметной области (domain knowledge)*, например, об организации или управлении предприятием.
- *Знания о взаимодействии (interface knowledge)*, которые выступают в форме общих декларативных правил поведения, а также правил пополнения и модификации знаний предметной области. Правила взаимодействия представляют собой основу архитектуры агента и подразделяются на: а) правила принятия решений в условиях неопределенности; б) правила управления кооперацией агентов.
- *Управляющие знания (control knowledge)* – знания, применяющие знания взаимодействия к знаниям предметной области для пополнения и изменения рабочей памяти.

Рабочая память предназначена для хранения временных данных, полученных от подсистемы управления, пользователя или подсистемы управления коммуникациями. В рабочей памяти содержится информация о целях, информация о текущих и завершенных задачах, входящие и исходящие сообщения и текущие обязательства. Рабочая память функционирует по принципу глобальной доски объявлений.

Подсистема управления конфликтами позволяет агенту принимать решения при получении противоречивой информации от других агентов.

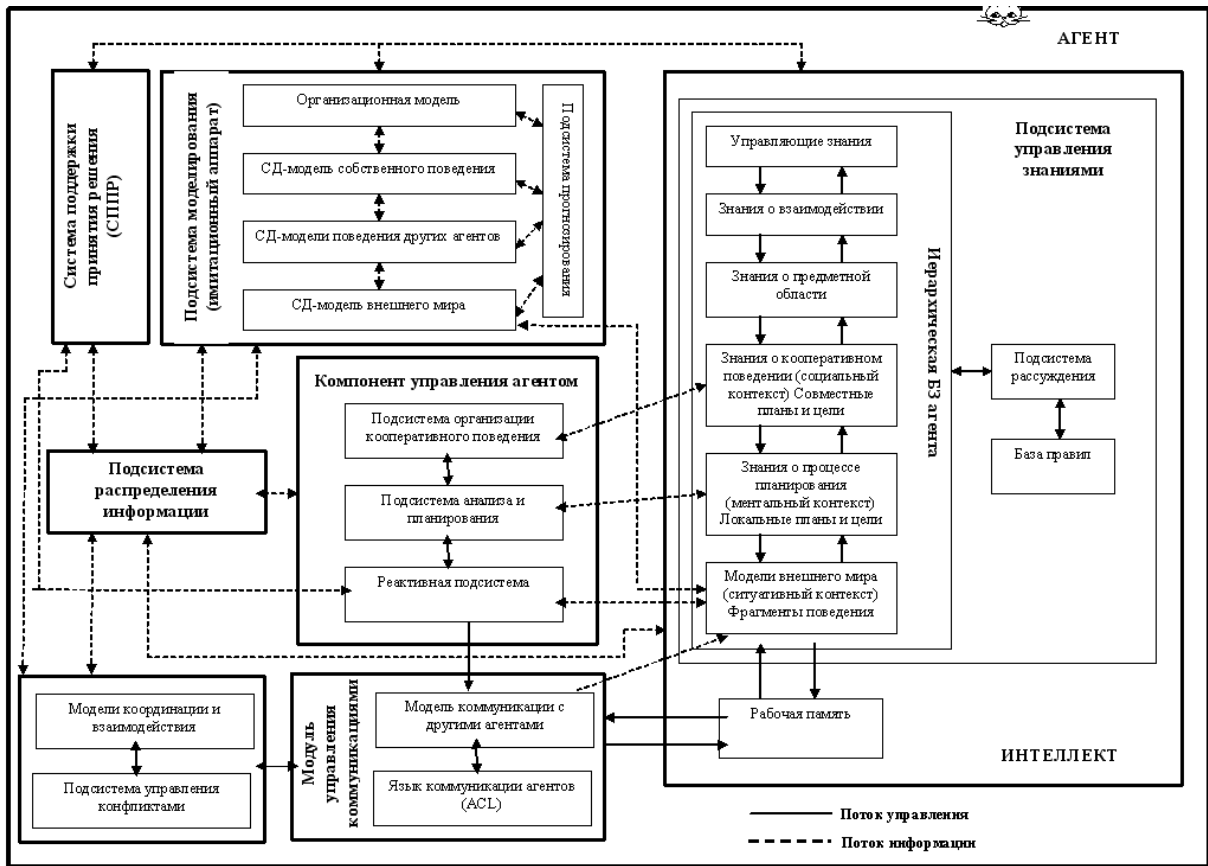


Рис. 3. Развернутое представление архитектуры агента с имитационным аппаратом

Система поддержки принятия решений (СППР) реализуется на основе технологии OLAP.

Организационная модель необходима для автономного функционирования агента в мультиагентной среде; при этом агенту доставляется информация о наличии других агентов, их ролях, характере коммуникации и т.д. (организационная модель должна также включать модель самого агента).

Подсистема организации кооперативного поведения агентов участвует в конструировании планов совместного поведения агентов для достижения некоторых общих целей или выполнения своих обязательств перед другими агентами, а также выполнения соглашений.

Модели координации содержат общие принципы и условия обмена сообщениями в ходе совместных действий; при этом они обычно определяются в виде правил кооперации и общей оценки ситуации. Языки кооперации служат для явной, декларативной спецификации моделей координации.

Модуль управления коммуникациями осуществляет составление и отправку сообщений, посылаемых другим агентам, а также занимается получением подтверждений о доставленных сообщениях. Сообщения составляются из коммуникационных примитивов, получаемых с помощью правил управления задачами и правил кооперации. Каждый примитив характеризуется своим типом и содержанием.

Человеко-машинный интерфейс определяет способы взаимодействия между системой и пользователем. В общем случае, агент сообщает пользователю результаты своей работы, которые пользователь должен подтвердить, прежде чем они вступят в силу и будут переданы другим агентам.

8. Подходы к реализации агентов с имитационным аппаратом на основе СД-моделей в мультиагентной среде

Региональные инновационные структуры относятся к классу систем, обладающих высокой комбинаторной и динамической сложностью. В инновационной структуре взаимодействуют объекты различной природы и функционального назначения. Каждый объект имеет собственные "интересы" и функции в рамках конкретных подструктур и инновационной структуры в целом. Особенности региональных инновационных структур, рассмотренные выше, в первую очередь – обуславливающие их динамическую сложность, существенно затрудняют создание целостных моделей для поддержки принятия решений в области управления такими системами. Различный уровень знаний о компонентах

региональных инновационных структур и взаимодействиях между ними и их субъектами обуславливает необходимость использовать различные методы анализа данных и различные методы моделирования.

Агенты, представляющие про-активные сущности реального мира (инвесторы, производители, исследователи и т.п.), в общем, должны обладать интеллектуальностью. Это значит, что они должны "обладать" знаниями о себе и окружающем мире и быть способными определять и корректировать свое поведение в соответствии с этими знаниями. Основным инструментом, используемым интеллектуальными агентами при принятии решения, являются методы искусственного интеллекта. Алгоритм принятия решения обычно не существует в явном виде, а формируется из правил и закономерностей в процессе решения задачи. Неинтеллектуальные агенты работают по процедурной схеме, когда алгоритм поведения и выбора альтернатив зафиксирован в программном коде или записан на некотором интерпретируемом языке сценариев (скрипт-языке).

Интеллектуальные агенты, обладая развитым внутренним представлением сцены и возможностями рассуждений, способны запоминать и анализировать различные ситуации, предвидеть возможные реакции на свои действия, делать из этого выводы, полезные для дальнейших действий, и в результате прогнозировать свое будущее и изменения сцены. Для этого агенты должны быть снабжены имитационным аппаратом. В качестве средства реализации этого аппарата могут быть использованы системно-динамические модели.

Схема работы модели без учета имитационных возможностей агента принципиально не отличается от функционирования классических агентных моделей: на каждом шаге моделирования каждый агент выбирает один из множества альтернативных вариантов собственных действий, исходя из сформулированного для него критерия эффективности (Борцев, 2004). После реализации агентами выбранных альтернатив происходит переход к следующему модельному шагу. Отличие предлагаемого способа построения агентной модели от классической схемы заключается в механизме определения значения критерия оценки альтернативы. В классическом случае значение критерия определяется параметрами анализируемой альтернативы и текущими и/или предшествующими значениями параметров среды функционирования агента. При использовании же агентов с имитационным аппаратом при выборе варианта собственных действий на некотором шаге агент косвенно учитывает не только текущее и предшествующие состояния среды, но и предполагаемые будущие значения ее параметров, а также влияние на эти значения деятельности других агентов. Это обеспечивается путем "прогонки" анализируемого варианта действий агента на структурно идентичной вспомогательной имитационной модели. В работах (Горохов, Олейник, 2006; Новиков, Чхартушвили, 2003; Поспелов, 2003; Скобелев, 1998) рассмотрены несколько вариантов организации подобного рекуррентного использования имитационных моделей.

Принимая во внимание ограниченность доступных вычислительных ресурсов, в настоящей работе используется специфичный способ организации рекуррентного моделирования, обеспечивающий априорное ограничение глубины рекурсии, и предлагается несколько подходов реализации имитационного аппарата агентов на основе системно-динамических моделей в мультиагентной среде. Одним из путей формирования мультиагентной среды с использованием системно-динамических (СД) моделей является организация распределенной работы комплекса СД-моделей в рамках архитектуры HLA (High Level Architecture) (Олейник, 2004). При этом каждая отдельная СД-модель, представляющая конкретный объект или подсистему, является самостоятельным моделирующим агентом. В терминологии HLA такой агент называется Федератом. Состав федерации (совокупности взаимодействующих федератов) для решения сложной задачи определяется описывающим эту задачу фрагментом концептуальной модели предметной области.

Первый подход предполагает, что для прогнозирования развития сцены осуществляется копирование модели сцены в имитационный аппарат агента. Про-активный агент в данном случае формирует собственный внутренний виртуальный мир, приняв за основу текущее состояние и структуру внешнего виртуального мира (комплексной модели, включающей модель среды и модели действующих в ней про-активных сущностей). Выработка стратегии поведения рассматриваемого агента осуществляется путем "внутренней" симуляции различных сценариев собственного развития и развития сцены в результате выбора агентом на каждом шаге тех или иных действий для достижения собственных целей. В данном случае агент берет на себя функции моделирования всего окружающего мира. Такое решение существенно повышает автономность агента, но порождает ряд проблем. Во-первых, полное дублирование модели окружающего мира, или даже его упрощенной копии, потребует выделения для агента дополнительных ресурсов. Во-вторых, нет однозначного решения для учета работы других про-активных агентов, функционирующих параллельно в той же среде.

Второй подход, основанный на порождении "параллельных" виртуальных миров агентами, предполагает создание упрощенных моделей других агентов. Такое решение приемлемо, если в рамках

решаемой задачи допускается рассмотрение других агентов как исполнителей заданий агента – владельца виртуального мира. Система получается относительно простой с динамической точки зрения, так как в качестве общих приоритетов выступают цели агента-владельца. При этом система обладает достаточно высокой "прогностической" ценностью для агента-владельца виртуального мира – позволяет прогнозировать его эффективное развитие на много шагов вперед. К сожалению, подобные допущения существенно снижают адекватность получаемых решений для прогнозирования реального развития инновационной идеи, так как ситуация, при которой субъекты инновационной структуры жертвуют своими интересами в интересах других субъектов, является крайне редкой. При моделировании реальных сценариев развития про-активные агенты должны работать как коллектив (или как конкуренты), взаимодействуя на сцене.

Третий подход предполагает, что в ходе моделирования используются два вида агентных моделей, идентичных по структуре, но различающихся внутренней организацией агентов. Первый вид, назовем его *базовой агентной моделью*, характеризуется тем, что при принятии решения о действиях, реализуемых на очередном шаге моделирования, агент оперирует лишь текущими и предшествующими параметрами состояния среды функционирования и никак не учитывает влияние на значение критерия выбора последующей активности агентов-конкурентов или агентов-союзников. Второй вид моделей – *модели с внутренней имитацией*, при той же структуре среды функционирования использует агентов с архитектурой, представленной на рис. 2. При определении значения критерия выбора альтернативного действия на некотором шаге агент запускает базовую агентную модель, предварительно проинициализировав ее текущими параметрами состояния среды, и моделирует, с заданным горизонтом, последствия собственных потенциальных действий. Возможна также и организация большей глубины рекурсивного использования моделей. В этом случае агент основной модели использует для определения критерия выбора вспомогательную модель с внутренней имитацией, агенты которой, в свою очередь, также могут использовать вспомогательные модели с внутренней имитацией, и так далее – до нижнего уровня, на котором для прогнозирования результатов собственной активности агентами используются базовые модели.

В работе (Шишаев и др., 2007) приведен пример реализации агента с имитационным аппаратом на основе вышеописанного подхода. В примере представлена имитационная модель развития новой образовательной услуги в регионе. Модель построена с использованием агентного подхода. Агент соответствует новой образовательной программе, реализуемой учебным заведением, и осуществляет в ходе моделирования управление ее внедрением и развитием. Целью деятельности агента является максимизация востребованности образовательной услуги. Поведение агента на каждом шаге моделирования определяется текущим состоянием сцены (регионального рынка образовательных услуг) и результатами "прогонки" его внутренней имитационной модели при различных вариантах воздействия на среду. Имеется возможность корректировки действий агента на каждом шаге в ручном режиме. В результате моделирования вырабатываются различные по эффективности линии управления реализацией образовательной услуги.

Проведенные с полученной моделью эксперименты показали перспективность рекуррентного использования агентных имитационных моделей при моделировании сложных динамических систем. При параллельном использовании в модели обычных агентов и агентов с имитационным аппаратом последние, в большинстве случаев, побеждают в конкурентной борьбе за счет более обоснованного выбора стратегий управления образовательной услугой. Также был обнаружен любопытный эффект, заключающийся в том, что наибольшая эффективность реализации образовательной услуги достигается при частом изменении стратегии управления ее развитием, выражающемся в перераспределении доступных средств по основным статьям расходов. Несмотря на это, следует также отметить, что важным вопросом, требующим дополнительной детальной проработки, является влияние на качество моделирования глубины рекурсивного вызова моделей.

9. Заключение

Разработаны научно-методические основы интеграции мультиагентных технологий и методов системной динамики, которые развивают и детализируют современные концепции комплексного моделирования сложных региональных социально-экономических систем.

Рассмотрена обобщенная модель деятельности интеллектуальных агентов субъектов инновационной деятельности в виртуальной среде. Разработана гибридная InteRRap-архитектура интеллектуального агента с внутренней подсистемой имитационного моделирования, представляющей собой имитационный аппарат (комплекс системно-динамических моделей). Предложены подходы реализации имитационного аппарата агентов на основе системно-динамических моделей в мультиагентной среде.

Реализация предлагаемых подходов интеграции мультиагентных технологий, системно-динамических моделей в рамках информационно-аналитической среды поддержки регионального инновационного развития обеспечивает возможность создания полимодельных комплексов пространственно-распределенных сложных систем. Полученные комплексы являются основой для формирования и исследования сценариев развития региона с имитацией сложных динамических процессов и взаимодействий между субъектами инновационной деятельности, представляемых проактивными агентами.

С точки зрения теоретической значимости, полученные в ходе исследований результаты совершенствуют как научно-методический аппарат интеграции методов системной динамики и мультиагентных технологий, так и расширяют области его практического применения.

С точки зрения практической значимости, представленные в статье разработки могут быть использованы:

- при моделировании инновационных процессов в региональных системах различной степени сложности и масштаба;
- в составе систем поддержки принятия решений для исследования динамики поведения субъектов инновационной деятельности в различных ситуациях;
- для информационного обеспечения инновационного развития и коммерциализации научных разработок.

Представленные в статье результаты получены при выполнении работ по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 08-07-00301-а "Разработка информационной технологии и распределенной информационно-аналитической среды поддержки инновационной деятельности", а также работ по программе фундаментальных исследований Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН. Полученные научные результаты использованы при разработке "Стратегии социально-экономического развития Мурманской области до 2025 года".

Литература

- Борщев А.В.** Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика. *Exponenta Pro*, № 3, с.38-47, 2004.
- Городецкий В.И.** Многоагентные системы: основные свойства и модели координации поведения. *Информационные технологии и вычислительные системы*, № 1, с.22-34, 1998.
- Горохов А.В., Олейник А.Г.** Использование методов системной динамики в мультиагентных моделях. *Информационные технологии в региональном развитии, Апатиты, КНЦ РАН*, с.20-24, 2006.
- Маслобоев А.В., Шишаев М.Г.** Мультиагентная система интеграции распределенных информационных ресурсов инноваций. *Программные продукты и системы*, № 4(92), с.30-32, 2007.
- Маслобоев А.В., Путилов В.А., Шишаев М.Г.** Концептуальная модель агентно-ориентированной виртуальной бизнес-среды развития инноваций. *Сб. науч. тр. ИИММ КНЦ РАН: Информационные технологии в региональном развитии, Апатиты, КНЦ РАН*, с.15-27, 2007.
- Маслобоев А.В., Путилов В.А., Шишаев М.Г.** Обзор современного состояния технологии мультиагентных систем и перспективы ее развития. *Сб. науч. тр. ИИММ КНЦ РАН: Информационные технологии в региональном развитии, Апатиты, КНЦ РАН*, с.6-12, 2006.
- Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г.** Рефлексивные игры. *М., СИНТЕГ*, 160 с., 2003.
- Олейник А.Г.** Технология проектирования распределенной среды имитационного моделирования для поддержки регионального управления. *Теория и практика системной динамики, Тез докл. Всерос. науч. конф., Апатиты, КНЦ РАН*, с.13-20, 2004.
- Поспелов И.Г.** Моделирование экономических структур. *М., Фазис*, 194 с., 2003.
- Скобелев П.О.** Виртуальные миры и интеллектуальные агенты для моделирования деятельности компании. *Тр. VI Национ. конф. КИИ-1998, Том 2, Пушино*, с.714-719, 1998.
- Тарасов В.Б.** От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. *М., УРСС*, 348 с., 2002.
- Шишаев М.Г., Шемякин А.С., Маслобоев А.В.** Рекуррентная агентная модель продвижения новой образовательной услуги. *Системный анализ и информационные технологии САИТ-2007, Тр. II Межд. конф. в 2 т., М., ЛКИ*, т.1, с.285-287, 2007.