

УДК 004.89, 004.942

Когнитивная технология динамического формирования и конфигурирования проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств

А.В. Маслобоев^{1,2,3}

¹ *Институт информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН*

² *Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, кафедра математики*

³ *Апатитский филиал МГТУ, кафедра геоэкологии*

Аннотация. В работе предложен новый когнитивный подход к построению региональных распределённых информационных систем на основе сетецентрических мультиагентных виртуальных пространств, интегрированных в глобальную информационную инфраструктуру. Разработана когнитивная технология динамического формирования и конфигурирования проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств как ситуационно-коалиционных мультиагентных систем, предназначенных для решения задач управления рискоустойчивым региональным развитием. Технология является основой формирования расширяемой многофункциональной сетецентрической информационно-аналитической среды, обеспечивающей поддержку управления региональной безопасностью.

Abstract. In this research work a new cognitive approach to regional distributed information systems development based on network-centric multi-agent virtual environments synthesis integrated into global information infrastructure has been proposed. A cognitive information technology for dynamic formation and configuration of the problem-oriented multi-agent virtual environments as situational coalition multi-agent systems applicable for risk-sustainable regional development problem-solving has been developed. The technology provides a framework to formation of extensible multifunctional network-centric information and analytical environment for management support of regional security.

Ключевые слова: когнитивная информационная технология, мультиагентная система, виртуальное пространство, самоорганизация, динамическое формирование, информационная поддержка, управление, региональная безопасность

Key words: cognitive information technology, multi-agent system, virtual environment, self-organization, dynamic synthesis, information support, management, regional security

1. Введение

В настоящее время Арктическая зона РФ является объектом сферы национальных интересов ведущих мировых держав, что ослабляет позиции присутствия РФ в Арктике, владеющей значительными её территориями, и формирует вектор угроз национальным интересам РФ в этом районе: геополитическим, социально-экономическим, оборонным, демографическим и экологическим. Повышение интереса к Российской Арктике обуславливает высокую актуальность темы защиты интересов РФ в Арктической зоне и выводит задачу обеспечения глобальной безопасности развития арктических регионов России на передний план, позиционируя её как самостоятельную проблему, требующую научной проработки. Решение данной задачи затрудняется необходимостью интеграции, обработки и анализа большого объёма разноплановой информации для различных ведомств, а также согласованности информационного взаимодействия соответствующих структур безопасности. В связи с этим, одним из приоритетных направлений государственной политики РФ в Арктике, согласно "Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года" (Стратегия, 2013), является развитие сферы информационных технологий и связи. Реализация арктической стратегии по данному направлению предполагает создание комплексной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры для поддержки управления рискоустойчивым развитием территорий Арктической зоны РФ и входящих в её состав регионов.

Анализ осуществляемых в Российской Арктике мер по развитию сферы информационных технологий для задач обеспечения различных видов безопасности (социально-экономической, промышленно-экологической, кадровой и др.) свидетельствует о том, что их эффективность существенно

снижается вследствие отсутствия целостной информационно-аналитической среды для комплексного решения задач управления глобальной безопасностью арктических регионов, позволяющей повысить оперативность, достоверность и качество выдаваемой информации об обстановке в Арктической зоне РФ.

Таким образом, актуальной задачей является разработка новых и совершенствование существующих методов и средств информационно-аналитической поддержки управления глобальной безопасностью развития региональных социально-экономических систем (РСЭС) Арктической зоны РФ, подверженных влиянию множества разнородных внутренних и внешних факторов, а также технологий формирования и конфигурирования расширяемой многофункциональной информационной инфраструктуры безопасности арктических регионов, наделённой потенциалом к саморазвитию и самоорганизации. Информационно-аналитическая среда для поддержки управления глобальной безопасностью арктических регионов, согласно статье (Маслобоев, 2013), представляет собой комплекс проблемно-ориентированных, взаимоувязанных и взаимодействующих информационных и аналитических ресурсов и систем, а также технологическую и организационную инфраструктуру их создания и использования.

Актуальность и высокая значимость научных исследований, направленных на создание методов и технологий информационного обеспечения управления рискоустойчивым развитием арктических регионов, для экономики и обороноспособности страны подтверждается рядом принятых Правительством РФ нормативных документов, в частности:

– "Основы государственной политики РФ в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу" (утверждены Указом Президента РФ 18.09.2008 г.);

– "Стратегия национальной безопасности РФ до 2020 года" (утверждена Указом Президента РФ 12.05.2009 г., № 537);

– "Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года" (утверждена Указом Президентом РФ 20.02.2013 г.).

В статье рассматриваются метод виртуализации проблемно-ориентированной деятельности субъектов регионального управления на основе мультиагентного подхода (Deloach, Garcia-Ojeda, 2010) и основанная на нём когнитивная технология динамического формирования и конфигурирования проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств, представляющих собой ситуационно-коалиционные мультиагентные системы для решения задач управления глобальной безопасностью арктических регионов (далее – региональной безопасностью). Технология является основой формирования проактивной виртуальной среды региональной безопасности в Арктической зоне РФ, наделённой потенциалом к самоорганизации и саморазвитию. Средства реализации метода и технологии агентной виртуализации обеспечивают выполнение определённых функций, а их интеграция приводит к синергетическому эффекту и получению результатов, обладающих высоким уровнем когнитивности.

2. Методологическая база исследования

Современный этап развития компьютерных наук обозначил новое перспективное направление в области создания технологий построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений – когнитивные информационные технологии (Редько, 2013). Когнитивные технологии обеспечивают возможность формализации знаний об исследуемых объектах и процессах информатизации, анализ их структурной динамики и функциональной организации на основе имитации поведения, а также возможность виртуализации контуров управления данными объектами и процессами. Это обуславливает целесообразность применения когнитивного подхода и реализующих его технологий, в частности технологии мультиагентных систем (Путилов и др., 2008), в качестве основы для автоматизации процессов управления региональной безопасностью.

Методология когнитивного моделирования (Кочкаров, Салпагаров, 2007) ориентирована на анализ и поддержку принятия решений в сложных ситуациях для систем, характеризующихся многоаспектностью происходящих в них процессов (экономических, социальных и т.д.) и их взаимосвязанностью, динамичностью и высокой степенью неопределённости, отсутствием достаточной количественной информации о динамике протекающих в них процессов, что вынуждает переходить к качественному анализу таких систем. В силу указанных особенностей социально-экономические системы относятся к классу слабоструктурированных систем. В данном случае когнитивный подход к анализу слабоструктурированных систем основан на моделировании субъективных представлений (знаний) экспертов о системе и/или ситуации в виде концептуальных моделей (Маслобоев, Путилов, 2011), являющихся базой для создания полимодельных комплексов, входящих в состав средств поддержки принятия решений по управлению сложными динамическими системами и процессами.

В рамках настоящего исследования предложен новый когнитивный подход к решению задач управления безопасностью РСЭС, основанный на интеграции методов концептуального, системно-динамического и мультиагентного моделирования, а также методов вербального анализа решений (Larichev, Brown, 2000). Предлагаемый подход (рис. 1) и реализующие его методы обеспечивают основу для получения качественно новых решений в области создания средств информационно-аналитической поддержки управления развитием сложных динамических систем и процессов различной природы, а также возможность разработки когнитивных информационных технологий построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сфере управления безопасностью РСЭС в слабоструктурированных ситуациях.

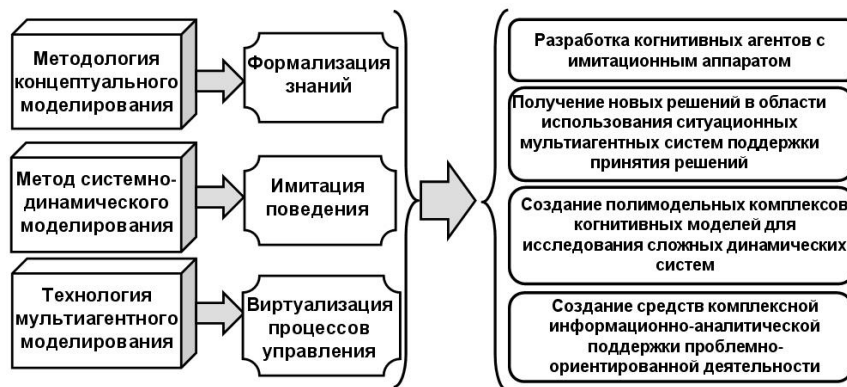


Рис. 1. Отличительные особенности когнитивного подхода к решению задач информационной поддержки управления региональной безопасностью

3. Концептуальная модель мультиагентной виртуальной среды региональной безопасности

В условиях современных глобализационных процессов и тенденций развития информационно-коммуникационных технологий адекватным подходом к управлению безопасностью РСЭС является неявное управление через создание эффективной сетевидной информационной инфраструктуры региональной безопасности, обеспечивающей информационное сопровождение процессов управления рискоустойчивым региональным развитием и способствующей формированию механизмов упреждающего реагирования на возможные кризисные ситуации и потенциальные угрозы, возникающие на треке развития региона. Одним из вариантов реализации такой инфраструктуры является виртуальная информационно-аналитическая среда региональной безопасности (Маслобоев, 2013). Одной из главных задач виртуальной среды региональной безопасности является удовлетворение информационных потребностей и обеспечение согласованного информационного взаимодействия субъектов и организационных структур безопасности посредством оперативного и своевременного предоставления соответствующих информационных ресурсов (данных) и сервисов для решения задач управления региональной безопасностью в кризисных ситуациях. Для этого в рамках виртуальной среды региональной безопасности должны формироваться потенциально эффективные проблемно-ориентированные виртуальные организационные структуры, способные участвовать в решении определённых классов задач управления региональной безопасностью с учётом специфики возникающих кризисных ситуаций, согласованности целей взаимодействия входящих в их состав компонентов, временных и ресурсных ограничений.

Проблемно-ориентированные организационные структуры представляют собой согласованно взаимодействующую совокупность субъектов безопасности, каждый из которых обладает целенаправленным поведением, имеет необходимый набор компетенций и ресурсов для реализации некоторого процесса или функции в направлении решения конкретных задач, что в совокупности ведёт к достижению общей цели формирования структуры – локализации возникшей кризисной ситуации в процессе совместного решения определённых в её рамках задач. Таким образом, процесс управления региональной безопасностью в кризисных ситуациях может быть частично автоматизирован путём реализации метода виртуализации проблемно-ориентированной деятельности субъектов безопасности, основанного на формировании допустимых виртуальных организационных структур безопасности (ВОСБ) и предварительного оценивания их потенциальной эффективности в смысле разрешимости той или иной ситуации.

Формальную основу для автоматизированного формирования ВОСБ составляет концептуальная модель мультиагентной информационно-аналитической среды (КМ МИАС) поддержки управления

региональной безопасностью (Маслобоев, Путилов, 2011). КМ МИАС, ориентированная на агентную реализацию, задана в виде теоретико-множественных отношений и представляет собой следующий набор множеств:

$$KM_{МИАС} = \{O, S, R, A, CS, CSC, CSF, Z, ZC, P, SS, U, I, Attr\}.$$

Основными элементами, образующими состав модели, являются: O – множество объектов безопасности; S – множество субъектов безопасности; R – множество информационных и аналитических ресурсов; SS – множество организационных структур безопасности; A – множество когнитивных агентов, представляющих интересы субъектов безопасности в распределённой мультиагентной виртуальной среде поддержки управления региональной безопасностью; CS и CSC – множества кризисных ситуаций и их классов соответственно; CSF – иерархический классификатор предметных областей кризисных ситуаций; Z и ZC – множества задач управления безопасностью и их классов соответственно; P – множество процессов управления безопасностью в кризисных ситуациях; U – множество клиентских и серверных узлов, на которых развёрнута агентная платформа для исполнения агентов системы информационной поддержки управления региональной безопасностью; I – отношения на множествах объектов модели; $Attr$ – множество атрибутов объектов модели.

Практическим воплощением предложенной КМ МИАС является её реализация в виде прикладной OWL-онтологии региональной безопасности.

Субъекты безопасности являются автономными проактивными сущностями и обладают целенаправленным поведением, что обеспечивает предпосылки для виртуализации их проблемно-ориентированной деятельности посредством программных мобильных агентов. В связи с этим в модели явно представлены когнитивные агенты субъектов безопасности A как специальный тип объектов. Агенты обеспечивают имитацию деятельности субъектов безопасности в распределённой виртуальной среде поддержки управления региональной безопасностью, предоставляют информационные сервисы другим агентам, реализуют поиск потенциальных субъектов совместной деятельности и участвуют в формировании ВОСБ для решения задач управления безопасностью в кризисных ситуациях.

Для решения задач Z субъекты безопасности S должны обладать соответствующими компетенциями. В качестве количественной меры для оценки компетенций субъектов безопасности предложено использовать их информационную и функциональную мощности. Информационная и функциональная мощности субъектов безопасности однозначно определяют возможный класс задач, решаемых их виртуальными представителями (когнитивными агентами), а их типизация – спектр возможных функций, реализуемых агентами. Информационная мощность субъекта безопасности I_z для решения задачи $z \in Z$ задаёт имеющиеся у него в наличии информационные ресурсы для поддержки принятия решений в рассматриваемой кризисной ситуации $cs \in CS$. Функциональная мощность субъекта безопасности F_z определяет набор реализуемых им функций (предоставляемых сервисов, аналитических ресурсов). Семантика компетенций субъектов безопасности определяется на онтологии региональной безопасности, созданной на основе КМ МИАС.

Пусть известно конечное множество агентов субъектов безопасности $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, такое, что каждому субъекту безопасности ставится в соответствие его виртуальный представитель в распределённой информационной среде, т.е. $G: S \rightarrow A$, $SA \subseteq S \times A$. Тогда каждый из агентов $a_i \in A$, $i = [1, n]$ обеспечивает реализацию компетенций своего хозяина-пользователя в распределённой виртуальной среде, а именно I_a и F_a . Компетенции агентов реализуются, как правило, в виде информационных сервисов, которые агенты предоставляют по запросу пользователям, либо другим агентам.

Задача синтеза ВОСБ заключается в подборе такого множества агентов $A_{cs} \subseteq A$, что их суммарная компетенция удовлетворяет требованиям разрешимости кризисной ситуации CS с учётом имеющейся неполной исходной информации о ситуации, а также минимизации вовлечённых в процесс управления безопасностью информационных, аналитических и исполнительных ресурсов, т.е. $R_{cs}(t) \rightarrow \min$, причём ресурсы должны обеспечить решение всех задач $z \in Z$ и должны быть доступны на интервале времени $[t_0; T]$, где t_0 – время поступления информации о кризисной ситуации (идентификация входных данных в системе) в виде пользовательского запроса; T – момент времени принятия решения.

Для совместного решения задач $z \in Z$ в контексте рассматриваемой кризисной ситуации агенты могут объединяться в коалиции. Коалицию агентов можно определить как группу агентов, объединённых общими целями для решения задачи $z \in Z$ и обладающими достаточной суммарной компетенцией для её решения. Таким образом, ВОСБ представляют собой коалиции агентов и набор информационных ресурсов, сформированные на основе концептуальных описаний рассматриваемых кризисных ситуаций и решаемых в их рамках задач. Автоматизированный синтез ВОСБ основан на анализе отношений и атрибутов объектов КМ МИАС. Возможны два способа формирования проблемно-

ориентированных коалиций агентов: статический и динамический. В случае статического формирования коалиций параметры, описывающие текущую ситуацию $cs \in CS$ и компетенции агентов $\langle I_a, F_a \rangle$, зафиксированы, тогда как при динамическом формировании коалиций они меняются с течением времени. В работе исследован процесс динамического формирования коалиций агентов. Совокупность коалиций агентов $COAL_{CS} = \{coal_{I_a, F_a} \subseteq A\}$, объединяющая всех агентов субъектов безопасности, участвующих в разрешении кризисной ситуации $cs \in CS$, соответствует синтезируемой ВОСБ. Таким образом, задача синтеза ВОСБ для управления безопасностью в кризисных ситуациях непосредственно связана с формированием проблемно-ориентированных коалиций агентов.

4. Общая характеристика метода виртуализации процессов управления региональной безопасностью

Анализ современного состояния исследований отечественных и зарубежных научных школ в области разработки проблемно-ориентированных мультиагентных систем (МАС) показывает, что, несмотря на большой потенциал развития современных МАС и базирующихся на них технологических решений для различных предметных областей, вопросы приложения технологии МАС для задач информационного обеспечения управления безопасностью РСЭС недостаточно изучены.

Применение мультиагентного подхода для решения задач управления рискоустойчивым региональным развитием позволяет создать адекватную информационно-аналитическую среду поддержки управления безопасностью функционирования РСЭС, учитывая распределённость, динамичность и структурную сложность образующих их подсистем. При таком подходе предоставляется возможность реализовать виртуализацию функций управления отдельными составляющими региональной безопасности за счёт делегирования их интеллектуальным проактивным агентам, а на основе проблемно-ориентированных коалиционных взаимодействий агентов обеспечить самоорганизацию и эффективное функционирование мультиагентной виртуальной среды безопасности региона и её компонентов. Формирование коалиций агентов – это один из эффективных подходов к синтезу и динамическому конфигурированию ВОСБ под возникающие задачи управления безопасностью региона в кризисных ситуациях с учётом динамически меняющихся условий.

Агентно-ориентированная виртуализация представляет собой процесс не только создания виртуальных представителей (агентов) субъектов проблемно-ориентированной деятельности в открытых распределённых информационных средах, моделирующих их поведение и взаимодействие, а также установление отношений между ними, но и формирования модели среды двух искусственно имитируемых реальностей: мультиагентного виртуального пространства и семантического пространства знаний, т.е. $G: E_{RW} \rightarrow E_{VW}$, $S \rightarrow A$, $SA \subseteq S \times A$, где $G: E_{RW} \rightarrow E_{VW}$ – функция отображения множества объектов реального мира в виртуальное пространство; S – множество субъектов проблемно-ориентированной деятельности; A – множество виртуальных деятелей (агентов); $SA \subseteq S \times A$ – симметричное отношение соответствия "субъект – агент", ассоциирующее субъекта-пользователя с представляющим его в виртуальной среде когнитивным агентом. При этом мультиагентная виртуальная среда предоставляет прямой доступ к объектам и ресурсам виртуального пространства для имитации поведения исследуемой системы, для которой построено виртуальное пространство, при различных управляющих воздействиях на эту систему в соответствии с законами реального мира.

Расширение сферы приложения агентно-ориентированной виртуализации к задачам управления региональной безопасностью обеспечило предпосылки для развития нового класса МАС – ситуационно-коалиционные мультиагентные системы (СК МАС), ориентированные на информационную поддержку процессов принятия решений в области управления слабоструктурированными системами, к которым относятся РСЭС. СК МАС представляет собой совокупность взаимодействующих коалиций когнитивных агентов и виртуальных сетей ресурсов, динамически формируемых в зависимости от класса возникающих ситуаций на треке развития исследуемой системы и множества решаемых при этом задач. Под текущей ситуацией понимается состояние исследуемой системы, характеризующееся набором параметров, в рассматриваемый момент времени. В общем случае СК МАС с учётом модели текущей ситуации и определённого набора задач образуют проблемно-ориентированные виртуальные пространства, включающие множество когнитивных агентов, обладающих необходимыми компетенциями для их решения, и множество информационно-аналитических ресурсов. Отличительной особенностью когнитивных агентов, используемых в качестве базовых проактивных компонентов СК МАС, является реализация полного цикла "восприятие – познание – исполнение" в среде виртуально имитируемой реальности. Основными компонентами задачи формирования СК МАС являются множество ситуаций, множество коалиций агентов, множество ресурсов и их конфигурация в виртуальном пространстве, определяющая возможные направления использования СК МАС.

Формальная модель СК МАС в терминах КМ МИАС может быть представлена в виде

$$CK MAC = \{A, COAL/CS, R, VE, ORG, CS, CSC\},$$

где A – множество агентов, из которых формируются коалиции для решения задач, определённых в рамках модели текущей ситуации; $COAL/CS \subseteq A$ – множество коалиций агентов; R – множество ресурсов; VE – виртуальная среда, в которой находится СК MAC, причём $CK MAC \subseteq VE$; ORG – множество базовых организационных структур, соответствующих конкретным функциям (ролям) агентов и отношениям между ними; CS – множество ситуаций; CSC – множество классов ситуаций, для которых предназначена СК MAC.

В результате для информационной поддержки принятия решений и повышения уровня координации субъектов региональной безопасности в ходе исследований разработан метод виртуализации процессов управления безопасностью РСЭС. Метод основан на предложенном когнитивном подходе к созданию средств информационно-аналитической поддержки управления сложными динамическими системами на основе интеграции методов концептуального, системно-динамического и мультиагентного моделирования. Суть метода заключается в формировании проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств, представляющих собой СК MAC, для различных классов задач управления региональной безопасностью как в стабильных, так и в кризисных ситуациях. По сравнению с классической агентной технологией предложенный метод обеспечивает более высокую автономность и адаптивность агентов в процессе распределённого решения пользовательских задач, а также наделяет агентов более развитыми когнитивными свойствами за счёт использования полимодельных комплексов, что повышает результативность работы агентов в мультиагентной виртуальной среде. Метод ориентирован на открытые сети агентов и предполагает динамическое формирование виртуальных миров когнитивных агентов для совместного решения задач управления региональной безопасностью. Для этого необходимы специальные механизмы самоорганизации, реализация которых позволяет обеспечить формирование проблемно-ориентированных виртуальных пространств.

В рамках метода предложена реализация механизма самоорганизующегося управления на основе использования градиентных (вычислительных) полей (Mamei et al., 2004). В одноранговых распределённых MAC с данной моделью самоорганизации аналогом поля и его градиента является некоторая распределённая структура данных с уникальным идентификатором, представляющая собой вычислительное поле градиента. В среде функционирования агентов эта структура данных представляется в унифицированной форме, которая обеспечивает доступ к ней других агентов в каждой точке виртуальной среды. Вычислительное поле генерируется и поддерживается некоторым источником в виртуальной среде, в качестве которого могут рассматриваться специальная инфраструктура, место в сети (узлы сети с инсталлированной агентной платформой, на которых функционируют агенты), сами агенты-инициаторы или иные сущности системы. Поле несёт контекстную (локальную или глобальную) информацию о среде и/или об инициаторе градиентного поля, необходимую для принятия решений, координации и самоорганизующегося управления.

Функция распространения поля может быть возложена на агентов системы. В этом случае агенты обеспечивают ретрансляцию поля соседям, модифицируя его силу. Этот процесс передачи поля от агента к агенту повторяется до тех пор, пока сила поля не станет меньше некоторого порога, когда она полагается равной нулю. Агенты могут инициировать не одно, а несколько различных вычислительных полей (в том числе и их комбинации) в зависимости от своей роли в системе и ресурсных возможностей.

Формальная модель вычислительного поля агента в виртуальной среде может быть представлена в виде

$$ACF = \langle ID, LC, PR, t \rangle,$$

где ACF – вычислительное поле агента; ID – имя или уникальный идентификатор структуры данных, представляющей вычислительное поле; LC – контекстуальная информация об агенте-инициаторе поля (локальный контекст агента, включающий описание его компетенций, модели текущей ситуации и решаемых задач, места нахождения в сети, характеристики силы поля в соответствующей точке виртуальной среды и т.д.); PR – правило распространения поля по сети, определяющее, каким образом значения параметров поля изменяются в виртуальном пространстве от узла к узлу (начиная с соседних узлов); t – параметр времени, характеризующий время жизни агента, либо время актуализации его локального контекста.

Агенты имеют доступ к полю, воспринимая значения его параметров и изменяя его с целью отражения локального контекста, представляющего местоположение и/или состояние агента. Агент, находящийся в определённой точке виртуального пространства, воспринимает части поля градиента от своих соседей и выбирает стратегию поведения (детерминированную или вероятностную), управляемую результирующим полем. Он взаимодействует с соседями в той или иной форме, например, двигается к

ним, посылает через них сообщения, запрашивает у них информацию и т.д., но источником координирующей информации при этом выборе остаются градиентное поле и те его локальные характеристики, которые воспринимаются каждым агентом.

Реализация рассмотренного подхода к самоорганизации агентов позволяет сформулировать правило, в соответствии с которым в рамках предложенного метода виртуализации осуществляется формирование проблемно-ориентированных виртуальных пространств: необходимым и достаточным условием формирования СК МАС в виртуальной среде являются коллинеарность и сонаправленность градиентов вычислительных полей рассматриваемого множества агентов и некоторого источника-инициатора, т.е. $\nabla ACF|a_k \uparrow \nabla ACF|a_i$, где $\nabla ACF|a_k$ – градиент вычислительного поля агента $a_k \in A$, инициировавшего поле; $\nabla ACF|a_i$ – градиент вычислительного поля других агентов виртуальной среды $a_i \in A, i = [1, n]$. При этом агент-инициатор $a_k \in A$ "притягивает" к себе агентов $a_i \in A, i = [1, n]$ и является управляющим агентом-модератором в рамках формируемого вокруг него проблемно-ориентированного виртуального пространства (рис. 2). Координация "движения" агентов в виртуальном пространстве (динамика МАС) выполняется формой поля и его изменением от узла к узлу, от агента к агенту. Информация о направлении "движения" агентов получается посредством оценки изменения вычислительного поля и представленного в нём локального контекста агентов по различным направлениям.

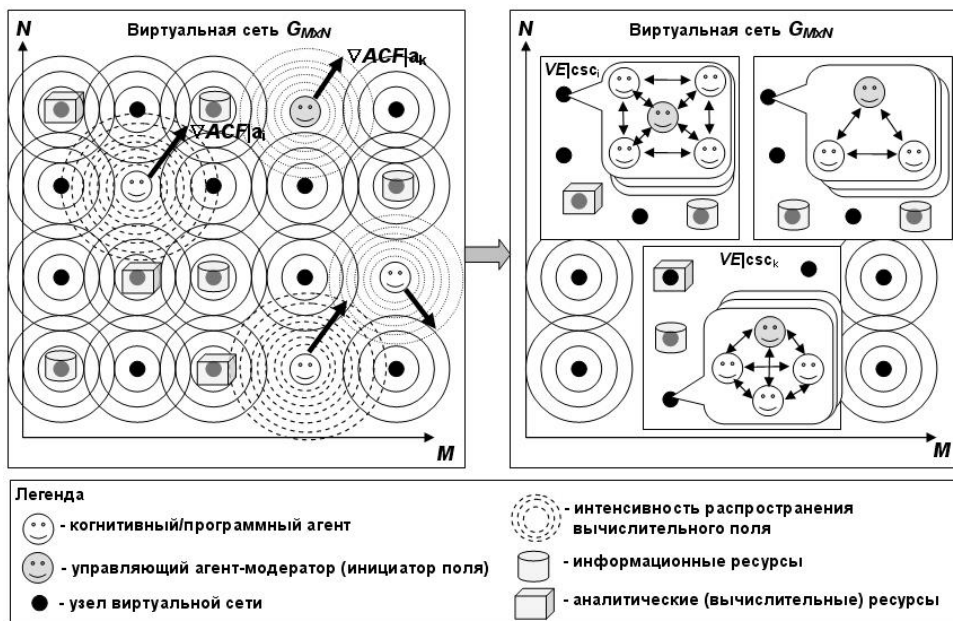


Рис. 2. Схематическое представление реализации механизма самоорганизации МАС на основе модели градиентных (вычислительных) полей

Самоорганизация агентов заключается в автоматическом формировании в рамках распределённой информационной среды проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств, объединяющих агентов с близкими целями и требуемым набором компетенций в коалиции, и генерации управляющих агентов-модераторов для каждого отдельного виртуального пространства, реализующих процедуры распределения задач между агентами, координации процессов межкоалиционной миграции и реорганизации, выдачи удостоверяющих сертификатов и т.д. Вместе с тем разработаны процедуры согласования индивидуальных и групповых целей когнитивных агентов и их функциональная организация. Групповая цель коалиции агентов определяется в виде целевой функции от индивидуальных целей входящих в данную коалицию агентов. Вступление нового агента в коалицию возможно только в том случае, когда это максимизирует целевую функцию, описывающую групповую цель коалиции.

Метод виртуализации процессов управления региональной безопасностью реализован в рамках когнитивной технологии динамического формирования и конфигурирования проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств (рис. 3), представляющих собой СК МАС, и включает шесть основных этапов:

1. Формализация описаний разнотипных кризисных ситуаций в терминах КМ МИАС и определение параметров моделей решаемых задач. Исходными данными для реализации данного этапа

являются онтологические описания кризисных ситуаций, решаемых задач, информационных ресурсов и компетенций агентов системы в терминах КМ МИАС.

2. Формирование коалиций агентов, обладающих достаточными суммарными компетенциями для решения определённого на первом этапе перечня задач, и последующий синтез допустимых ВОСБ в рамках мультиагентной информационно-аналитической среды с учётом заданных ограничений. Состав коалиций и компетенции агентов могут динамически меняться в зависимости от внешних условий: подключения нового узла, агента или веб-сервиса к системе, а также появления в системе новых информационно-аналитических ресурсов или интеграции в виртуальную среду компонентов сторонних информационных систем. В простейшем случае коалиция может состоять из одного агента. Для расширения функционального потенциала агентов предложено комбинировать сервисы, предоставляемые агентами, с зарегистрированными в системе веб-сервисами, доступными агентам.

3. Оценка неопределённости и степени разрешимости рассматриваемых кризисных ситуаций с учётом имеющихся ограничений на основе синтезированных альтернативных вариантов ВОСБ (оценка потенциальной эффективности конфигурации ВОСБ).

4. Доопределение параметров ВОСБ в автоматизированном режиме либо в режиме диалога с пользователем и формирование на их основе СК МАС управления безопасностью, представляющих собой совокупность взаимодействующих коалиций когнитивных агентов и виртуальных сетей ресурсов, динамически формируемых в зависимости от класса (модели) анализируемых кризисных ситуаций на треке развития РСЭС и множества решаемых при этом задач. Под моделью кризисной ситуации понимается формализованное описание параметров состояния РСЭС в рассматриваемый момент времени. Каждая отдельная СК МАС представляет собой проблемно-ориентированное виртуальное пространство, полученное на основе интеграции ассоциированных с синтезированными ВОСБ информационных и аналитических (вычислительных) ресурсов, требуемых для обработки и анализа сформированных наборов данных.

5. Оценка потенциальных угроз региональной безопасности с учётом выбранных критериев и анализ сценариев развития ситуации с помощью имитационного моделирования.

6. Доопределение необходимых параметров локального контекста агентов и реконфигурация ВОСБ и СК МАС в случае получения новой информации из внешней среды либо по результатам прогноза изменения параметров состояния рассматриваемого множества кризисных ситуаций.

Ограничениями приложения метода виртуализации могут быть причины, связанные с возникновением нештатных ситуаций внутри самой МАС, например, получение от внешней среды непонятной информации, трудновоспринимаемой агентами системы и которая не побуждает агентов на какие-либо действия, либо инициируемое агентами вычислительное поле не воспринимается другими агентами и его действие бесполезно, что замедляет процесс самоорганизации агентов в проблемно-ориентированные виртуальные пространства и препятствует их координации.

Когнитивные агенты, обладая развитым внутренним представлением сцены и возможностями рассуждений, должны быть способными запоминать и анализировать различные ситуации, предвидеть возможные реакции на свои действия, делать из этого выводы, полезные для дальнейших действий, и в результате прогнозировать результативность своего поведения и изменения сцены. Для этого агенты должны быть снабжены имитационным аппаратом (Маслобоев, 2009). Анализ используемых в современной практике проектирования МАС архитектурных решений интеллектуальных агентов показал, что ни одно из них не обладает достаточной функциональностью для реализации указанных способностей.

Реализация предложенного когнитивного подхода, основанного на интеграции методов концептуального, системно-динамического и мультиагентного моделирования, обеспечила базис для нового решения в области создания и использования мультиагентных систем интеллектуальной поддержки принятия решений – технологии построения когнитивных агентов с имитационным аппаратом, имеющих гибридную архитектуру (рис. 4). Наличие имитационного аппарата в составе архитектуры когнитивных агентов обеспечивает агентам способность формирования модели внешнего мира, моделей собственного поведения, поведения других агентов и на основе результатов моделирования возможность строить стратегию своего поведения в ходе межагентных коммуникаций в виртуальной среде.

Структура когнитивного агента включает подсистему взаимодействия, базу знаний и имитационный аппарат. База знаний агента основана на онтологической модели представления знаний и реализована в виде онтологии предметной области, для которой предназначен агент. Подсистема взаимодействия реализована с помощью языков KIF (Knowledge Interchange Format) и ACL (Agent Communication Language). Имитационный аппарат представляет собой полную или упрощённую модель среды, в которой функционирует агент, рекуррентно вызываемую в процессе моделирования, и обеспечивает локальный прогноз результатов его потенциальной активности. В качестве средства реализации имитационного аппарата предложено использовать системно-динамические модели.

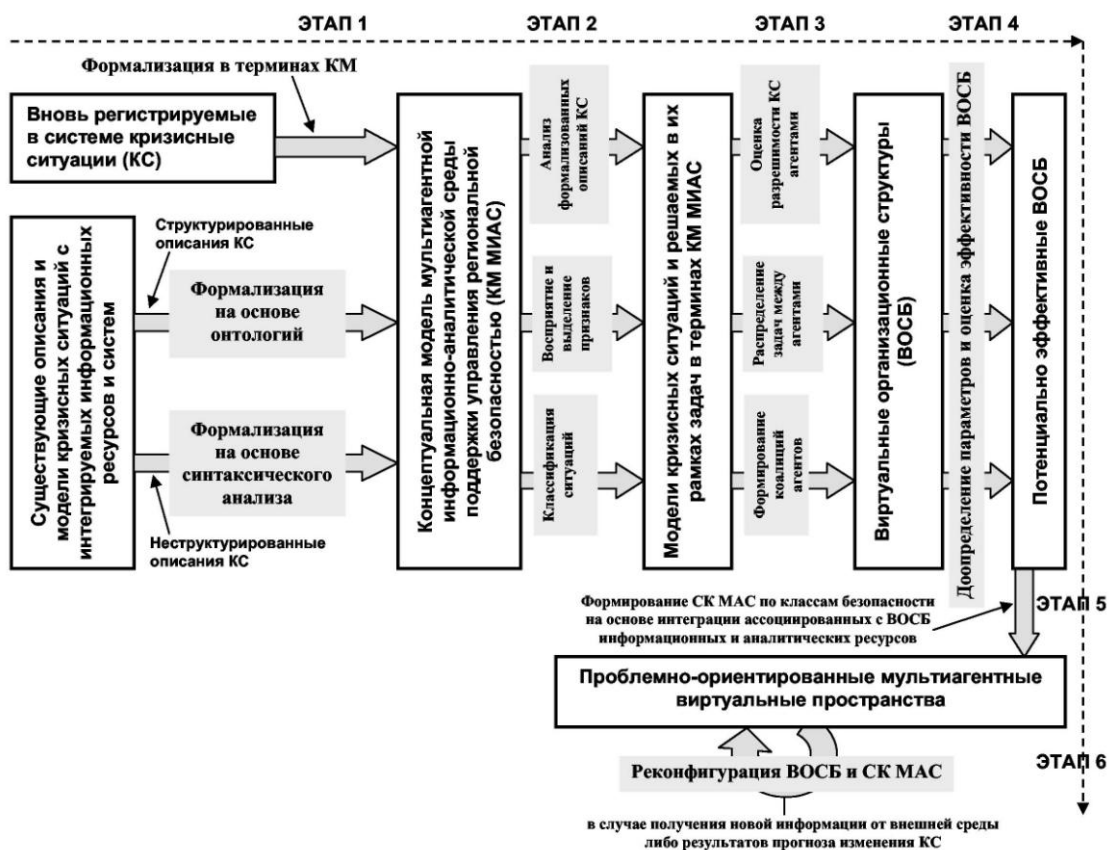


Рис. 3. Технология динамического формирования и конфигурирования проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств

В работе (Маслобоев, 2009) рассмотрены различные варианты реализации имитационного аппарата когнитивных агентов. В частности, предложено два подхода к реализации имитационного аппарата агентов на основе системно-динамических моделей в мультиагентной виртуальной среде. Первый подход предполагает, что для прогнозирования развития сцены осуществляется копирование модели сцены в имитационный аппарат агента. Второй подход основан на порождении "параллельных" виртуальных миров агентами и предполагает создание упрощённых моделей других агентов. При этом другие агенты являются исполнителями заданий агента – владельца виртуального мира. Это обеспечивается путём "прогонки" анализируемого варианта действий агента на вспомогательной имитационной модели. В данном случае агент берёт на себя функции моделирования всей окружающей среды. Такое решение существенно повышает автономность агента.

Отличие предлагаемого способа построения модели функциональной организации когнитивного агента от классической схемы заключается в механизме оценки альтернатив дальнейшего поведения. В классическом случае выбор определяется параметрами анализируемой альтернативы и текущими и/или предшествующими значениями параметров среды функционирования агента. Агенты с имитационным аппаратом при выборе варианта собственных действий на некотором шаге учитывают не только текущее и предшествующие состояния среды, но и предполагаемые будущие значения её параметров, а также влияние на эти значения деятельности других агентов.

5. Динамическое конфигурирование мультиагентной виртуальной среды региональной безопасности

В ходе исследований разработан прототип мультиагентной виртуальной информационно-аналитической среды поддержки управления региональной безопасностью "Безопасный Виртуальный Регион" (МИАС БВР) (Маслобоев, 2013) с унифицированной точкой доступа на основе веб-технологий. Специфическими особенностями синтезируемой МИАС БВР являются мультиагентная реализация, сетцентрическая организация, децентрализация функций управления, наличие средств интеграции разнородных информационных и исполнительных ресурсов, синергетические и когнитивные свойства

(самоорганизация компонентов на основе коалиционных взаимодействий когнитивных агентов и адаптация к динамике внешней среды). Информационно-технологическая модель и функциональные компоненты МИАС БВР представлены на рис. 5.



Рис. 4. Гибридная архитектура когнитивного агента с имитационным аппаратом

Сетевый подход (Иващенко и др., 2011) обеспечивает создание общего информационного поля (целостной виртуальной среды) для интеграции функционального и вычислительного потенциала разнородных проблемно-ориентированных информационных систем при решении задач управления сложными динамическими системами. Основу сетецентрического подхода к проектированию распределённых информационных систем составляет сервис-ориентированная архитектура (SOA, Service-Oriented Architecture) (Жебрун, 2005).

Реализация *синергетического подхода* (Смирнов, Шереметов, 2011) к управлению в мультиагентных виртуальных системах заключается в формировании коалиций агентов в результате самоорганизации и коллективной адаптации агентов к изменяющимся условиям среды. Эволюция мультиагентной виртуальной среды за счёт внутренних механизмов самоорганизации её активных элементов (агентов) – проявление синергетического эффекта. Это обеспечивает возможность перехода от закрытых иерархических структур с жёсткими связями и централизованным управлением к открытым сетевым виртуальным организационным структурам с гибкими связями и децентрализованным управлением.

Динамическое конфигурирование МИАС БВР и самоорганизация её компонентов являются необходимым и достаточным условием для поддержания её работоспособности и саморазвития в открытой гетерогенной распределённой информационной среде. Эффект, получаемый от использования МИАС БВР, тем выше, чем больше и содержательнее её внутренний объём – количество зарегистрированных разнотипных агентов субъектов безопасности, веб-сервисов, подключённых узлов, включающих информационные и аналитические ресурсы, интегрированных ведомственных информационных систем и т.д. Однако рост объёма системы естественным образом приводит к возрастанию сложности задач поиска информационных элементов и сервисов, композиции вариантов ВОСБ из-за полиномиального роста количества альтернатив. Для того чтобы система не теряла работоспособность в условиях собственного неограниченного роста, необходимы механизмы самоорганизации, позволяющие динамично формировать её внутреннюю структуру, с целью сокращения объёмов обрабатываемых и передаваемых по коммуникационным линиям данных в ходе регистрации новых информационных ресурсов и веб-сервисов в системе, поиска агентов совместной деятельности на распределённых узлах, оценки их компетенций с последующим формированием коалиций, синтеза потенциально эффективных ВОСБ.

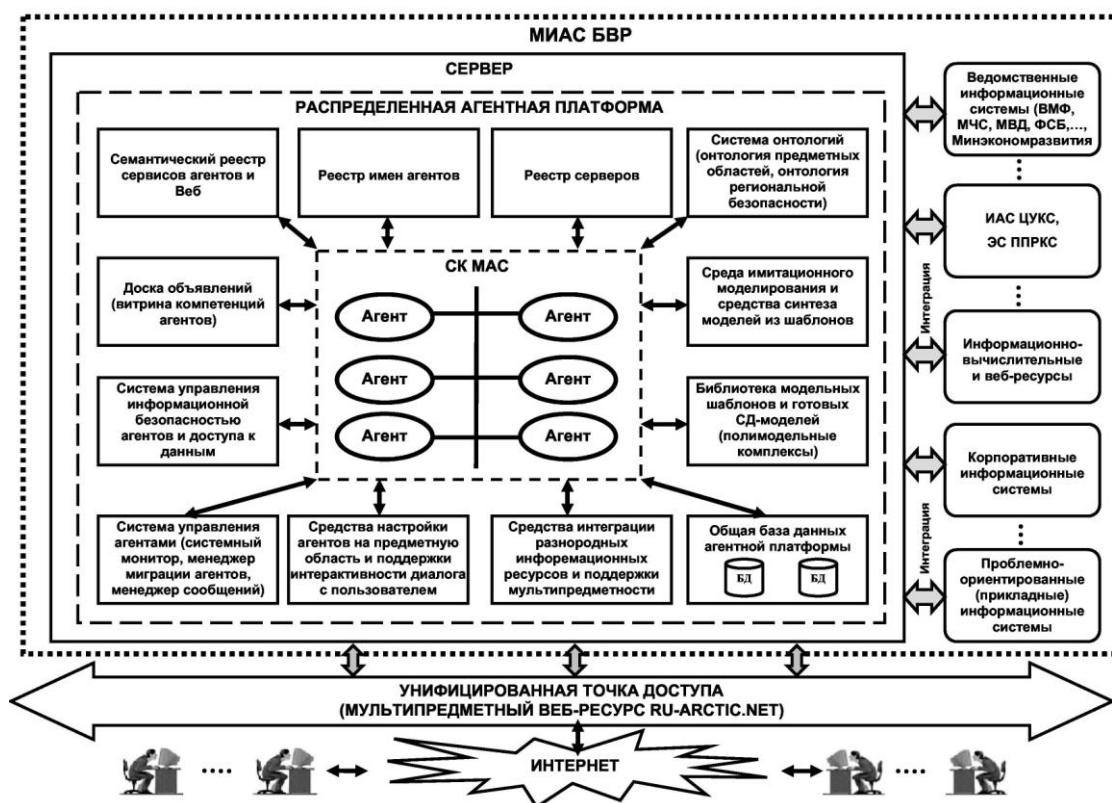


Рис. 5. Архитектура и функциональные компоненты МИАС БВР

Для решения этой задачи разработан дополнительный механизм самоорганизации агентов, повышающий эффект от реализации модели самоорганизации на основе градиентных (вычислительных) полей. Предложенный механизм самоорганизации основан на процедурах генерализации формализованных описаний кризисных ситуаций и решаемых задач с помощью древовидных концептуальных моделей предметной области. В данном случае генерализация описаний ситуаций и решаемых задач заключается в ослаблении критериев поиска сервисов агентов и информационных ресурсов, используемых в ходе синтеза ВОСБ, в семантическом пространстве, представляемом древовидной концептуальной моделью предметной области. При этом также используется древовидный классификатор кризисных ситуаций. Генерализация нескольких задач управления безопасностью заключается в создании новой задачи, "покрывающей" исходные, и генерации для решения этой задачи программного агента, обладающего необходимым набором компетенций и представляющего генерализованные компетенции коалиции агентов.

При таком подходе предварительное формирование проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств осуществляется посредством отображения целей и компетенций агентов на древовидные концептуальные модели предметной области, последующей локализации основной части поисковых и иных запросов агентов внутри группы и дальнейшего анализа активности их коммуникаций друг с другом. Сходство интересов (в том числе решаемых задач, требуемого набора компетенций или сервисов и т.д.) приводит к тому, что наиболее активные и информационно-насыщенные коммуникации агентов сосредоточены внутри отдельно взятого виртуального пространства, тогда как за его пределами информационный обмен менее активен. Такой подход обеспечивает возможность уменьшения сетевого трафика и нагрузки на узлы системы за счёт уменьшения количества межагентных коммуникаций и объёмов передаваемой и обрабатываемой ими информации.

Для решения задач динамического конфигурирования проблемно-ориентированных виртуальных пространств и МИАС БВР в целом необходимы специальные методы обучения агентов. Для этого предложен подход к обучению агентов, основанный на комбинированном использовании имитационного аппарата агентов и полиmodelных комплексов, входящих в состав распределённой агентной платформы МИАС БВР, а также общепринятой в теории коллективного интеллекта модели на основе коллективного обучения с подкреплением (Расселл, Норвиг, 2007), являющейся частным случаем метода обучения с учителем. При этом в роли учителя выступает как сама среда, так и её модель,

заложенная в имитационный аппарат агента и развиваемая им. В качестве одной из разновидностей моделей коллективного обучения с подкреплением предложено использовать модифицированный метод Q-обучения (Q-learning), базирующегося на реализации алгоритмов Q-маршрутизации и оптимизации по принципу муравьиной колонии (Swarm Intelligence) (Городецкий, 2012). Такой подход обеспечивает целенаправленный выбор стратегии поведения с учётом опыта предыдущих взаимодействий со средой и с другими агентами. Ограничением метода Q-обучения является его применимость только для ситуаций, которые можно представить в виде Марковского процесса принятия решений.

6. Заключение

В ходе проведённых исследований получены следующие основные результаты:

1. Для информационной поддержки принятия решений и повышения уровня координации субъектов региональной безопасности предложен метод мультиагентной виртуализации процессов управления безопасностью региональных социально-экономических систем, обеспечивающий адаптивное моделирование целенаправленной деятельности субъектов безопасности.

2. Разработана когнитивная технология динамического формирования и конфигурирования проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств как ситуационно-коалиционных мультиагентных систем для решения задач управления региональной безопасностью в кризисных ситуациях.

3. Разработаны архитектура, управляющее ядро и базовые программные компоненты сетевидной мультиагентной информационно-аналитической среды поддержки управления региональной безопасностью "Безопасный Виртуальный Регион" с унифицированной точкой доступа на основе веб-технологий. Ядро и компоненты распределённой информационной среды образуют иерархическое виртуальное пространство региона как интеграционную площадку для проблемно-ориентированных мультиагентных систем поддержки управления региональной безопасностью.

Сфера приложения разработанных в ходе исследований метода и технологии мультиагентной виртуализации процессов управления сложными слабоструктурированными системами может быть расширена, т.е. предназначена для решения широкого спектра задач, связанных с управлением региональным развитием, а также организационными и техническими системами различной степени сложности и масштаба.

Полученные результаты смогут найти широкое применение при реализации "Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года" на территории Мурманской области в рамках решения задач управления региональным развитием, а также для создания единого информационного пространства арктических регионов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №12-07-00138-а "Разработка когнитивных моделей и методов формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью арктических регионов России") и Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.8 "Развитие методологии проектирования региональных информационных систем для информационно-аналитической поддержки задач развития арктических регионов РФ").

Литература

- Deloach S.A., Garcia-Ojeda J.C.** O-MaSE: A customisable approach to designing and building complex, adaptive multi-agent systems. *International Journal of Agent-Oriented Software Engineering*, v. 4, Iss. 3, p. 244-280, 2010.
- Larichev O., Brown R.** Numerical and verbal decision analysis used for the problems of resources allocation in Arctic. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, v. 9, N 6, p. 263-274, 2000.
- Mamei M., Zambonelli F., Leonardi L.** Co-Fields: A physically inspired approach to motion coordination. *Intern. J. IEEE Pervasive Computing*, v. 3, N 2, p. 52-61, 2004.
- Городецкий В.И.** Самоорганизация и многоагентные системы. Часть 1. Модели многоагентной самоорганизации. *Известия РАН. Теория и системы управления*, № 2, с. 92-120, 2012.
- Жебрун Н.Н.** Использование сервис-ориентированных архитектур при построении информационных систем. *Алгоритмы, методы и системы обработки данных*, № 10, с. 249-254, 2005.
- Иващенко А.В. и др.** Мультиагентные технологии для разработки сетевидных систем управления. *Известия Южного федерального университета. Серия: Технические науки*, т. 116, № 3, с. 11-23, 2011.
- Кочкаров А.А., Салпагаров М.Б.** Когнитивное моделирование региональных социально-экономических систем. *УБС*, № 16, с. 137-145, 2007.

- Маслобоев А.В.** Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом. *Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета*, т. 12, № 1, с. 113-125, 2009.
- Маслобоев А.В.** Мультиагентная информационно-аналитическая среда поддержки управления региональной безопасностью "Безопасный Виртуальный Регион". *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, № 4(86), с. 128-138, 2013.
- Маслобоев А.В., Путилов В.А.** Концептуальная модель интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью развития региона. *Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета*, т. 14, № 4, с. 842-853, 2011.
- Путилов В.А., Шишаев М.Г., Олейник А.Г.** Технологии распределённых систем информационной поддержки инновационного развития региона. *Труды Института системного анализа РАН: Прикладные проблемы управления макросистемами*, М., Книжный дом "ЛИБРОКОМ", т. 39, с. 40-63, 2008.
- Расселл С., Норвиг П.** Искусственный интеллект. Современный подход. М., Вильямс, 1408 с., 2007.
- Редько В.Г.** Направления исследований когнитивных автономных агентов. *XV Всеросс. научно-технич. конф. "Нейроинформатика-2013"* (г. Москва, 21-25 янв. 2013 г., НИЯУ МИФИ). URL: http://neuroinfo.mephi.ru/sites/neuroinfo.mephi.ru/files/workshop_2013_redko.pdf.
- Смирнов А.В., Шереметов Л.Б.** Модели формирования коалиций кооперативных агентов: состояние и перспективы исследований. *Искусственный интеллект и принятие решений*, № 1, с. 36-48, 2011.
- Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года (утверждено Указом Президентом РФ 20.02.2013 г.). URL: <http://government.ru/news/432>.