

Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 3 (114). С. 7–18.
Cherepovets State University Bulletin, 2023, no. 3 (114), pp. 7–18.

Научная статья

УДК 004.896

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-3-114-1>

Среда формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем

Сергей Владимирович Дианов^{1✉}, Анатолий Николаевич Швецов²,
Даниил Сергеевич Дианов³, Георгий Германович Рапаков⁴

^{1,2,4} Вологодский государственный университет,

³ Вологодский научный центр РАН

Вологда, Россия

^{1✉} smithv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>

² dianov.sv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8297-8077>

³ grapakov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8996-0136>

⁴ daniil.dianov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4766-8801>

Аннотация. В статье представлен авторский подход к построению среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем. Рассматриваются специфика данных систем, задачи управления ими в контексте синтеза эффективной пространственной структуры, описаны разработанные архитектура и алгоритмы их функционирования, которые в перспективе могут стать элементами механизма их самоорганизации.

Ключевые слова: оптимизационные алгоритмы, сложные системы, пространственное размещение, агент-ориентированное моделирование

Благодарность. Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-28-01940 «Агент-ориентированное моделирование эффективного использования лесных ресурсов территории»).

Для цитирования: Дианов С. В., Швецов А. Н., Дианов Д. С., Рапаков Г. Г. Среда формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 3 (114). С. 7–18. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-3-114-1>.

Environment for the formation of agent-oriented spatially distributed systems

Sergey V. Dianov^{1*}, Anatoly N. Shvetcov², Daniil S. Dianov³, Georgii G. Rapakov⁴

^{1,2,4} Vologda State University,

Vologda, Russia

smithv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>

dianov.sv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8297-8077>

grapakov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8996-0136>

³ Vologda Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,

Vologda, Russia

daniil.dianov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4766-8801>

Abstract. The article presents the authors' approach to constructing an environment for the formation of agent-oriented spatially distributed systems. The authors consider specifics of these systems, the tasks of managing them in the context of synthesizing an effective spatial structure, and describe the developed architecture and algorithms for their functioning, which in their potential can become mechanism elements of their self-organization.

Keywords: optimization algorithms, complex systems, spatial distribution, agent-based modeling.

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 22-28-01940 "Agent-based modeling for the efficient use of the forest resources of the territory".

For citation: Dianov S. V., Shvetcov A. N., Dianov D. S., Rapakov G. G. Environment for the formation of agent-oriented spatially distributed systems. *Cherepovets State University Bulletin*, 2023, no. 3 (114), pp. 7–18. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-3-114-1>.

Введение

Моделирование оптимальных пространственных сетей является актуальным в различных предметных областях. Сюда можно отнести задачи по размещению производственной инфраструктуры предприятий, объектов логистических систем, объектов социальной инфраструктуры, объектов коммуникационных систем¹. Такие задачи рассматриваются в виде совокупности следующих составляющих: технической (определение минимума элементов, необходимых для достижения определенного результата); продуктивной (выбор наиболее правильного состава элементов); распределительной (оптимальное распределение элементов). Их исходными данными являются²: установленные приоритеты развития системы; имеющиеся ресурсы для реализации изменений; текущие параметры системы; существующие территориальные особенности; динамика происходящих в системе процессов.

¹ Дианов С. В. Задача оптимального пространственного размещения сервисов для систем с мобильными пользователями // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2020): материалы одиннадцатой заочной международной научно-технической конференции (Вологда, 29–30 июня 2020 года). Вологда: Вологодский государственный университет, 2020. С. 53–55.

² Швецов А. Н. и др. Сервис-ориентированный подход к проектированию агент-ориентированных моделей оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 79–99. DOI 10.23859/1994-0637-2023-1-112-6.

Условие задач по оптимизации формулируется следующим образом: среди элементов x , образующих множество X , найти такой элемент $x(i)$, при котором заданная целевая функция $F(x)$ принимает оптимальное значение $f(x(i))$ с учетом заданного критерия оптимальности. В задачах поиска оптимального размещения объектов переменной X , рассчитываемой в процессе решения, служит координатное положение объекта. Целевой функцией $F(x)$ является некоторый показатель оптимального расположения объекта, определяемый одним или несколькими независимыми критериями. В последнем случае каждый из критериев является самостоятельной целевой функцией $F_j(x)$, это задача многокритериальной оптимизации. При расчете итоговой целевой функции $F(x)$ учитываются значения всех критериев $F_j(x)$, каждый из них может иметь разную значимость (вес). Целевая функция $F(x)$ может классифицировать всю рассматриваемую территорию по дискретной или непрерывной количественной шкале значений пригодности или по качественной шкале — на два класса: пригоден / непригоден для расположения объекта.

При принятии решений по формированию систем с пространственно-распределенной структурой необходимо учитывать множество факторов. Сложная система может быть разложена на многие компоненты, которые достаточно тесно взаимосвязаны между собой, поэтому поведение каждого компонента зависит от поведения остальных.

Агент – это реальная или виртуальная автономная сущность, работающая во внешней среде, способная воспринимать и действовать в этой среде. Агент способен общаться с другими агентами, проявлять независимое поведение, которое в отдельных случаях рассматривается как следствие его знаний, взаимодействия с другими агентами и целей, которых он должен достичь. В широком смысле многоагентная система представляет собой модель, которая имитирует одновременные действия и взаимодействия нескольких агентов в попытке воссоздать течение некоторого процесса или состояние моделируемой сложной системы¹. Агенты могут создавать множество разнообразных связей при решении стоящих перед ними задач. Часть связей имеет, в том числе, и пространственное измерение. Специфика рассматриваемых систем позволяет отнести их к особому классу агент-ориентированных пространственно-распределенных систем, в котором территориальное размещение объектов координировано с их динамикой и активным поведением. Их необходимо рассматривать через призму понятия пространственных сетей, структура которых определяется поведением активных элементов. Такие системы имеют, как правило, неоднородное пространственное распределение элементов и агентов. Объектами изучения здесь являются местоположения, виды деятельности и потоки агентов, а также сети, развивающиеся во времени и пространстве.

Задача управления рассматриваемыми системами предполагает процесс изменения определенных параметров, находящихся под нашим контролем, для достижения

¹ Кузнецов А. В. Краткий обзор многоагентных моделей // Управление большими системами. 2018. Т. 71. С. 6–44.

поставленных целей¹. Кроме традиционного набора задач требуется также решить задачи по оптимизации топологии, т. е. территориальному размещению элементов, подсистем, коммуникационных связей². Выбор топологии объекта во многом определяет стоимостные и функциональные свойства системы. Для решения поставленной задачи требуется преодолеть ограничения существующих оптимизационных моделей. Оптимизационные модели предполагают рациональные действия агентов и детерминированность в представлении сложной динамики пространственных систем. Следовательно, необходимо решить задачи по разработке: агентных моделей распространения и локализации динамических процессов на территории; алгоритмов расчета оптимальных локализационных траекторий на основе разработанной модели; алгоритмов выбора оптимального размещения агентов, участвующих в локализации распространяющегося процесса, и их группировки (распределения) по локализуемым процессам.

В агент-ориентированных пространственно-распределенных системах при существовании множества критериев и внешних условий, которые проблематично учесть в полном объеме, сформулированные с их учетом оптимизационные задачи могут иметь различные решения³. Таким образом, проблема синтеза оптимальной пространственной архитектуры подобных систем является задачей многоаспектной и алгоритмически сложной. Ее эффективное решение возможно лишь с использованием научно обоснованных подходов.

Основная часть

В настоящее время для решения задач по пространственному размещению объектов в основном используются методы дискретной оптимизации, геоинформатики и имитационного моделирования. Тематика исследований в рамках дискретной оптимизации достаточно разнообразна и включает разработку и исследование алгоритмов их решения, изучение структуры и сложности задач, выделение полиномиально разрешимых случаев и построение семейств «трудных» задач для определенных классов алгоритмов. Но, в целом, данные методы не позволяют учитывать динамику в изменении характеристик исследуемых сущностей во времени, динамику их пространственного размещения, а также структуру существующих взаимосвязей между элементами систем. В свою очередь, использование имитационного моделирования позволяет анализировать динамические эффекты. Это в большей степени относится к агент-ориентированному моделированию. Поэтому агент-ориентированные модели

¹ Ржевский Г. А., Скобелев П. О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.

² Бескорвайный В. В. Оптимизация количества и топологии элементов при структурном синтезе территориально распределенных систем // Радиоэлектроника и информатика. № 1 (22). 2003. С. 101–104.

³ Трофименко А. С. Моделирование оптимизации сети медицинских учреждений в условиях реструктуризации здравоохранения // Электронный периодический научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». № 17 (январь). 2015. URL: <http://sci-article.ru/stat.php?i=1419161781> (дата обращения: 08.11.2022).

могут стать центральным элементом в системе поддержки и принятия решений по формированию агент-ориентированных пространственно-распределенных систем.

Построение имитационной модели происходит целенаправленно, поэтому для нее характерно адекватное отображение исследуемого объекта, а логико-математическая модель системы, в свою очередь, представляет собой реализованный в программе алгоритм функционирования системы. Под имитацией понимают проведение на компьютерах серий различных экспериментов с моделями, которые представлены в виде некоторого набора (комплекса) компьютерных программ. Сравнение характеристик (конструкций, управлений) моделируемого объекта осуществляется путем вариантных просчетов. Особую значимость имеет многократное воспроизведение моделируемых процессов с последующей их статистической обработкой, позволяющей учитывать случайные внешние воздействия на изучаемый объект. На основе полученной в ходе компьютерных экспериментов статистики делаются выводы в пользу того или иного варианта функционирования, или конструкции реального объекта, или сущности явления. Информационно-функциональная модель построения агент-ориентированных пространственно-распределенных систем представлена на рис. 1.

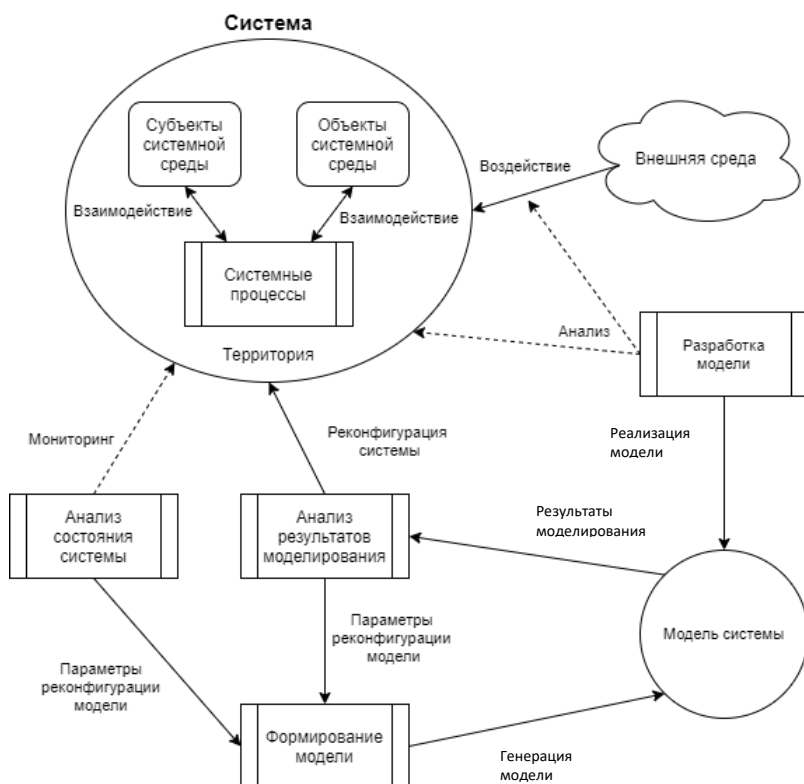


Рис. 1. Информационно-функциональная модель построения агент-ориентированных пространственно-распределенных систем

Описанный процесс требует создания среды промежуточного уровня, обеспечивающей интеграцию управляемой системы с ее имитационной моделью. Для рассматриваемого класса систем авторами статьи разработана архитектура среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем (рис. 2)¹. Основная парадигма заключается в том, что реконфигурация системы должна осуществляться интерактивно по результатам ее моделирования. При этом должно быть соблюдено условие соответствия модели и системы при изменении характеристик последней. Поэтому в архитектуру среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем введена подсистема мониторинга, в функции которой входит отслеживание значимых изменений состояния системы с последующей инициацией синтеза агент-ориентированной модели.



Рис. 2. Архитектура среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем

Процесс синтеза модели осуществляется одноименной подсистемой с использованием механизма онтологий. Онтологическая система, с одной стороны, выступает в качестве концептуальной основы агент-ориентированной модели, обеспечивающей ее связь с агент-ориентированной пространственно-распределенной системой, а, с другой стороны, выступает в качестве единого концептуального интерфейса между информационно неоднородными цифровой средой агент-ориентированной простран-

¹ Дианов С. В., Швецов А. Н., Дианов Д. С. Архитектура среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2022): материалы тринадцатой международной научно-технической конференции (Вологда, 29–30 июня 2022 года) / ответственный редактор В. А. Горбунов. Вологда: Вологодский государственный университет, 2022. С. 135–138.

ственно-распределенной системы и средой агент-ориентированной модели¹. Модель должна содержать набор управляющих механизмов, определяющих формирование разнообразных целевых установок. За счет этого обеспечивается вариативность полученных результатов. Их анализ производится подсистемой принятия решений. На основании полученных выводов осуществляется реконфигурация системы.

Алгоритмы, на основе которых выстраивается архитектура среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем, представлены на рис. 3. Каждый элемент имеет собственные алгоритмы функционирования.

На уровне среды определен общий алгоритм формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем. Алгоритм условно разделен на три этапа: проектирование элементов, запуск алгоритмов, отвечающих за функционирование элементов и завершение функционирования.

На этапе проектирования последовательно создаются следующие элементы среды: концепт модели, онтология модели, информационная среда модели, онтология интерфейса с информационной средой модели. Концепт модели проектируется в соответствии с принятой методологией на основании анализа моделируемой системы. Использование концепта позволяет сформировать онтологию модели, внутри которой создаются общие конструкции. В дальнейшем использование таких конструкций, на основе данных о состоянии предметной области, даст возможность сгенерировать модель. Данные о состоянии предметной области могут храниться в автоматизированных информационных системах, обеспечивающих процессы, происходящие в рамках предметной области. В этом случае перед этапом синтеза моделей необходимо привести их к виду, который обеспечит их эффективное использование. В представленной архитектуре среды это достигается за счет использования информационной среды модели и онтологии интерфейса. Последняя дает возможность соотнести информационные единицы моделируемой системы с информационными единицами модели.

На этапе запуска алгоритмов функционирования иницируются фоновые процессы по изменению информационной среды. Их задача – отслеживать изменения моделируемой системы и отображать эти изменения в информационной среде модели. Также иницируется алгоритм, отвечающий за мониторинг изменений информационной среды. Его основной задачей, наряду с отслеживанием изменений, является оценка их влияния на моделируемую систему и, в случае положительной оценки о влиянии, запуск процесса моделирования, результаты которого обеспечат принятие решений по необходимой модификации моделируемой системы.

На завершающем этапе отслеживаются действия лица, принимающего решения об окончании процессов и реконфигурировании системы. В этом случае завершается выполнение фоновых алгоритмов изменения и мониторинга.

¹ Суконщиков А. А. и др. Модели и методы построения нейро-нечетких интеллектуальных агентов в информационно-телекоммуникационных системах. Курск: Университетская книга, 2021. 152 с. ISBN 978-5-907441-30-9.

Алгоритмы изменения информационной среды модели и мониторинга реализуются на уровне Подсистемы мониторинга среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем. Существует два типа алгоритмов изменения: алгоритм изменения в неавтоматизированном режиме и алгоритм изменения в автоматизированном режиме. Второй алгоритм анализирует информационную среду моделируемой системы и, с использованием онтологии интерфейса с информационной средой модели, обеспечивает внесение соответствующих изменений автоматически. Первый алгоритм позволяет аналитику ввести информацию вручную в случае, когда соответствующие процессы не отражаются в информационной среде моделируемой системы. Алгоритм мониторинга отслеживает изменения и производит их содержательный анализ. Цель содержательного анализа – сравнить состояние системы до и после ее изменения и по результатам оценить необходимость ее реконфигурации. В случае положительного решения реализуется алгоритм генерации модели. Алгоритм мониторинга обеспечивает фоновый режим, т. е. мониторинг осуществляется в постоянном режиме.

Алгоритм генерации реализуется на уровне подсистемы синтеза моделей среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем. Данный алгоритм синтезирует модели на основе концепта, онтологии и данных информационной среды. В результате создается готовая для использования агент-ориентированная модель, отображающая текущее состояние системы. По окончании процесса синтеза осуществляется запуск алгоритма моделирования.

Алгоритм моделирования реализуется на уровне подсистемы принятия решений среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем. Алгоритм моделирования позволяет планировать проведение экспериментальных исследований, оценку полученных результатов и подготовку решений о необходимости текущей реконфигурации моделируемой системы.

Выводы

Разработанная среда агент-ориентированных пространственно-распределенных систем в своем потенциале может стать эффективным механизмом их самоорганизации. Для использования механизмов самоорганизации необходимо определиться с методами и алгоритмами, которые будут использовать субъекты системной среды. Данные методы должны содержать механизмы анализа ситуации, а также стратегии и тактики поведения субъектов. При этом важно проработать систему целевых установок для субъектов, обеспечивающих их активность по формированию собственных характеристик. Необходимо предусмотреть механизмы по обеспечению конкурентной среды. Особое внимание следует уделить возможности достижения системой итогового равновесного состояния, которое и определит характеристики ее оптимальной архитектуры. Также необходимо проработать механизмы по определению временных границ экспериментов, достаточных для получения требуемого результата.

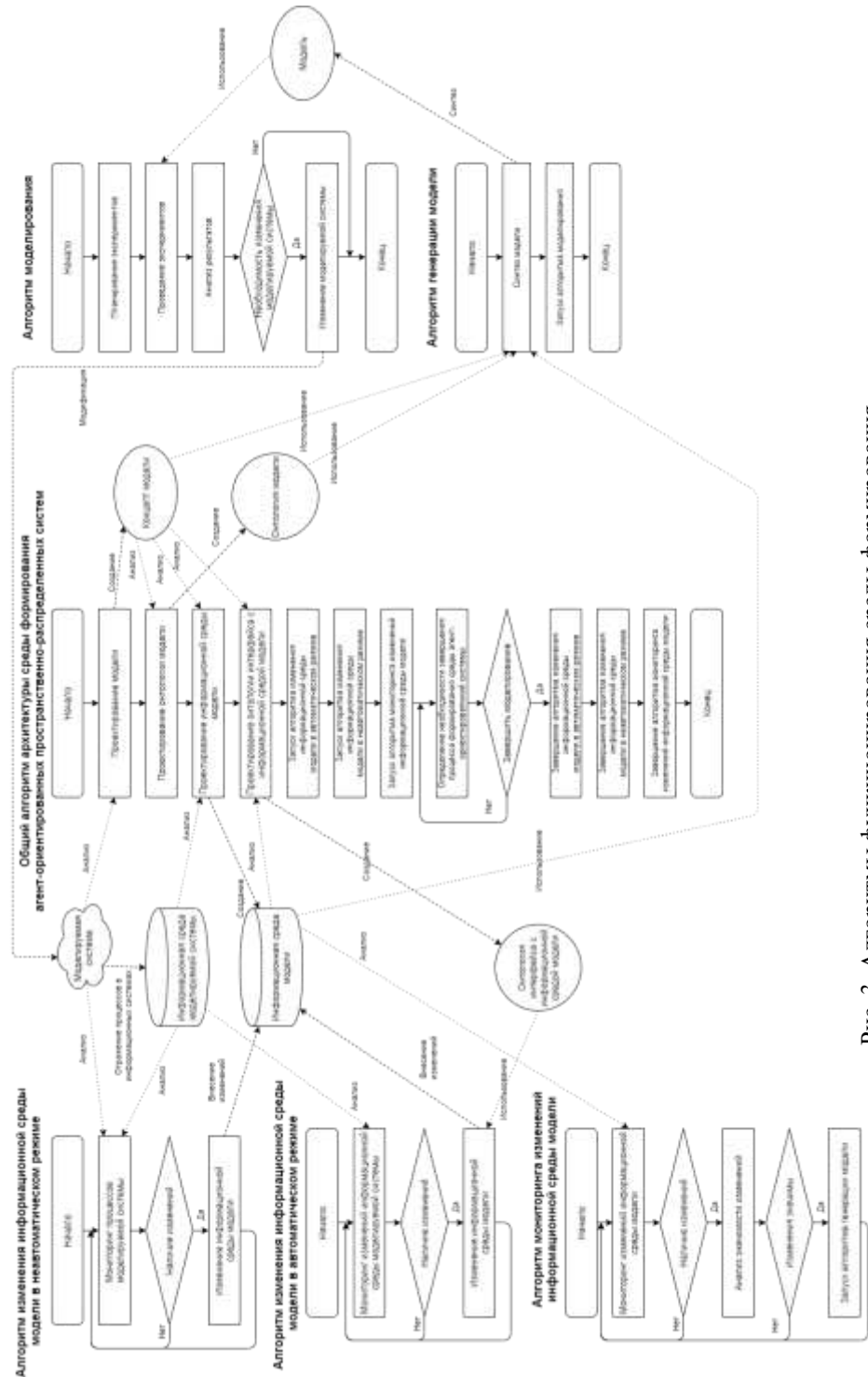


Рис. 3. Алгоритмы функционирования среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем

Список источников

Бескоровайный В. В. Оптимизация количества и топологии элементов при структурном синтезе территориально распределенных систем // Радиоэлектроника и информатика. № 1 (22). 2003. С. 101–104.

Дианов С. В. Задача оптимального пространственного размещения сервисов для систем с мобильными пользователями // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2020): материалы одиннадцатой заочной международной научно-технической конференции (Вологда, 29–30 июня 2020 года). Вологда: Вологодский государственный университет, 2020. С. 53–55.

Дианов С. В., Швецов А. Н., Дианов Д. С. Архитектура среды формирования агент-ориентированных пространственно-распределенных систем // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2022): материалы тринадцатой международной научно-технической конференции (Вологда, 29–30 июня 2022 года) / ответственный редактор В. А. Горбунов. Вологда: Вологодский государственный университет, 2022. С. 135–138.

Кузнецов А. В. Краткий обзор многоагентных моделей // Управление большими системами. 2018. Т. 71. С. 6–44.

Ржевский Г. А., Скобелев П. О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.

Суконщиков А. А. и др. Модели и методы построения нейро-нечетких интеллектуальных агентов в информационно-телекоммуникационных системах. Курск: Университетская книга, 2021. 152 с. ISBN 978-5-907441-30-9.

Трофименко А. С. Моделирование оптимизации сети медицинских учреждений в условиях реструктуризации здравоохранения // Электронный периодический научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». № 17 (январь). 2015. URL: <http://sci-article.ru/stat.php?i=1419161781> (дата обращения: 08.11.2022).

Швецов А. Н. и др. Сервис-ориентированный подход к проектированию агент-ориентированных моделей оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 79–99. DOI 10.23859/1994-0637-2023-1-112-6.

References

Beskorovainyi V. V. Optimizatsiia kolichestva i topologii elementov pri strukturnom sinteze terriorial'no raspredeleennykh system [Optimization of amount and location of distributive centers of transport-warehouse system]. *Radioelektronika i informatika* [Radioelectronics & Informatics], no. 1 (22). 2003, pp. 101–104.

Dianov S. V., Shvetsov A. N., Dianov D. S. Arkhitektura srede formirovaniia agent-orientirovannykh prostranstvenno-raspredeleennykh sistem [The architecture of agent-based spatially distributed systems formation environment]. *Intellektual'no-informatsionnye tekhnologii i intellektual'nyi biznes (INFOS-2022): materialy trinadsatoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Vologda, 29–30 iunია 2022 goda* [Intelligent Information Technologies and Intelligent Business (INFOS-2022): Proceedings of the thirteenth international scientific and technical conference. Vologda, 29-30 June 2022; ed. by V. A. Gorbunov]. Vologda: Vologodskii gosudarstvennyi universitet, 2022, pp. 135–138.

Dianov S. V. Zadacha optimal'nogo prostranstvennogo razmeshcheniia servisov dlia sistem s mobil'nymi pol'zovateliami [The task of optimal spatial placement of services for systems with mo-

bile users]. *Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (INFOS-2020): материалы однадцатой заочной международной научно-технической конференции, Вологда, 29–30 июня 2020 года* [Intelligent Information Technologies and Intelligent Business (INFOS-2020): Proceedings of the eleventh international correspondence scientific and technical conference, Vologda, 29-30 June 2020]. Vologda: Vologodskii gosudarstvennyi universitet, 2020, pp. 53–55.

Kuznetsov A. V. Kratkii obzor mnogoagentnykh modelei [The short review of multi-agent models]. *Управление большими системами* [Large-scale systems control], 2018, vol. 71, pp. 6–44.

Rzhevskii G. A., Skobelev P. O. *Kak upravliat' slozhnymi sistemami? Mul'tiagentnye tekhnologii dlia sozdaniia intellektual'nykh sistem upravleniia predpriatiiami* [How to manage complex systems? Multi-agent technologies for developing intelligent enterprise management systems]. Samara: Ofort, 2015. 290 p.

Sukonshchikov A. A. *Modeli i metody postroeniia neuro-nechetkikh intellektual'nykh agentov v informatsionno-telekommunikatsionnykh sistemakh* [Models and methods for constructing neuro-fuzzy intelligent agents in information and telecommunication systems]. Kursk: Universitetskaia kniga, 2021. 152 p. ISBN 978-5-907441-30-9.

Trofimenko A. S. Modelirovanie optimizatsii seti meditsinskikh uchrezhdenii v usloviakh restrukturizatsii zdravookhraneniia [Optimization modeling network of medical institutions in terms of health care reorganization]. *Elektronnyi periodicheskii nauchnyi zhurnal «SCI-ARTICLE.RU»* [Electronic periodical scientific journal "SCI-ARTICLE.RU"], 2015, no. 17. Available at: <http://sci-article.ru/stat.php?i=1419161781> (accessed: 08.11.2022).

Shvetsov A. N. i dr. Servis-orientirovannyi podkhod k proektirovaniu agent-orientirovannykh modelei optimal'nogo prostranstvennogo razmeshcheniia ob'ektov infrastruktury zdravookhraneniia [Service-oriented approach to designing agent-based models of optimal spatial placement of healthcare infrastructure facilities]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2023, no. 1 (112), pp. 79–99. DOI 10.23859/1994-0637-2023-1-112-6.

Сведения об авторах

Сергей Владимирович Дианов – кандидат технических наук; <https://orcid.org/0000-0001-8297-8077>, dianov.sv@mail.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 Вологда, Россия); **Sergey V. Dianov** – Candidate of Technical Sciences, <https://orcid.org/0000-0001-8297-8077>, dianov.sv@mail.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russia).

Анатолий Николаевич Швецов – доктор технических наук, профессор; <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>, smithv@mail.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 Вологда, Россия); **Anatoly N. Shvetsov** – Doctor of Technical Sciences, Professor; <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>, smithv@mail.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russia).

Даниил Сергеевич Дианов – аспирант; <https://orcid.org/0000-0003-4766-8801>, daniil.dianov@gmail.com, Вологодский научный центр РАН (д. 56а, ул. Горького 160014 Вологда, Российская Федерация); **Daniil S. Dianov** – Postgraduate Student; <https://orcid.org/0000-0003-4766-8801>, daniil.dianov@gmail.com, Vologda Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (56a, ul. Gorkogo, 160014 Vologda, Russia).

Георгий Германович Рапаков – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и вычислительной техники; <https://orcid.org/0000-0001-8996-0136>, grapakov@yandex.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 Вологда, Россия); **Georgii G. Rapakov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Automation and Computer

Engineering Department; <https://orcid.org/0000-0001-8996-0136>, grapakov@yandex.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.02.2023; одобрена после рецензирования 15.03.2023; принята к публикации 22.03.2023.

The article was submitted 09.02.2023; Approved after reviewing 15.03.2023; Accepted for publication 22.03.2023.