

**АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЛОЖНЫХ АГРОБИОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА****Б. В. Соколов, П. А. Охтилев****Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия*** pavel.oxt@mail.ru*

Аннотация. Рассматриваются вопросы автоматизации анализа и локализации барьеров интероперабельности разнородных технических систем сложных агробиотехнических объектов в условиях обеспечения решения задачи интегрированного мониторинга их состояния. Цель исследования — обеспечение возможности многовариантного прогнозирования и оценивания функциональной совместимости сопрягаемых унаследованных и создаваемых перспективных автоматизированных систем в сельскохозяйственном производстве на основе имитационного проблемно-ориентированного моделирования и применения интеллектуальных технологий извлечения экспертных знаний и манипулирования ими. Сформирована концептуальная модель локализации барьеров интероперабельности и разработано соответствующее технико-методическое обеспечение для обоснования типовых решений по преодолению барьеров интероперабельности, автоматизации процесса формирования сводной характеристики (профиля) сопряжения систем, проведения верификации, валидации и тестирования прикладных моделей интероперабельности для конкретных наборов сопрягаемых автоматизированных систем. Полученные результаты имеют важное практическое значение для технико-экономического эффекта при выборе технических решений по обеспечению интероперабельности автоматизированных систем и моделированию ее прогнозируемого уровня.

Ключевые слова: *интероперабельность, искусственный интеллект, сложные агробиотехнические объекты, проактивный мониторинг, автоматизация анализа*

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00823, <https://rscf.ru/project/24-19-00823/>.

Ссылка для цитирования: Соколов Б. В., Охтилев П. А. Автоматизация анализа интероперабельности технических систем сложных агробиотехнических объектов на основе технологий искусственного интеллекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 11. С. 928–934. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-11-928-934.

**AUTOMATION OF INTEROPERABILITY ANALYSIS OF TECHNICAL SYSTEMS
OF COMPLEX AGROBIOTECHNICAL OBJECTS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES****B. V. Sokolov, P. A. Okhtilev****St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg, Russia*** pavel.oxt@mail.ru*

Abstract. The issues of automation of analysis and localization of barriers of interoperability of heterogeneous technical systems of complex agrobiotechnical objects in the conditions of ensuring the solution of the problem of integrated monitoring of their state are considered. The purpose of the study is to provide the possibility of multivariate forecasting and assessment of the functional compatibility of mating legacy and emerging promising automated systems in agricultural production based on simulation problem-oriented modeling and the use of intelligent technologies for extracting expert knowledge and manipulating it. A conceptual model of interoperability barriers localization is formed and the corresponding technical and methodological support is developed to substantiate typical solutions for overcoming interoperability barriers, automating the process of forming a summary characteristic (profile) of system interfacing, verifying, validating and testing applied interoperability models for specific sets of mating automated systems. The obtained results are of great practical importance for the technical and economic effect when choosing technical solutions to ensure interoperability of automated systems and modeling the predicted level.

Keywords: interoperability, artificial intelligence, complex agrobiotechnical objects, proactive monitoring, analysis automation

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-19-00823, <https://rscf.ru/project/24-19-00823/>.

For citation: Sokolov B. V., Okhtilev P. A. Automation of interoperability analysis of technical systems of complex agrobiotechnical objects based on artificial intelligence technologies // *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 11. P. 928–934 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-11-928-934.

Современное сельскохозяйственное производство представлено сложными агробиотехническими объектами (САБО), обладающими динамической структурой физически, прагматически и функционально взаимосвязанных агробиологических и организационно-технических элементов, сельскохозяйственных ресурсов, разнородных средств автоматизации, эксплуатирующего персонала и пр. Эффективное интегрированное управление САБО и применение их по назначению в соответствии с фундаментальными принципами теорий систем, управления и комплексного системного моделирования возможно только на основе объективных, достоверных и полных данных корректного проактивного оценивания и многовариантного прогнозирования состояния этих объектов [1–5]. В то же время необходимо отметить, что информационно-технологическая инфраструктура современных САБО представлена гетерогенными информационными ресурсами и слабосвязанными разнородными автоматизированными системами (АС), которые выполнены на различных (зачастую зарубежных) аппаратно-программных платформах и ориентированы на решение частных прикладных задач. Таким образом, не обеспечивается функционирование САБО на основе современных принципов сквозной цифровизации Индустрии 4.0.

В этой связи приобретает актуальность задача исследования, построения и неразрушающего внедрения отечественной интегрированной системы мониторинга состояния САБО, представляющей собой специальную надстройку к унаследованной и создаваемой инфраструктуре САБО [6–8]. Однако для комплексного учета специфики совместного функционального применения и интеграции полного набора данных, информации и знаний о составляющих элементах САБО следует обеспечить необходимый уровень их интероперабельности — функциональной совместимости.

Необходимо отметить, что непосредственно решение задачи обеспечения интероперабельности АС САБО предваряет процесс анализа и исследования эксплуатационно-технических характеристик самих сопрягаемых систем, а также возможных путей их сопряжения в конкретных сценариях совместного применения. В этой связи актуальной первоочередной целью становится организация процесса имитационного моделирования функциональной совместимости АС САБО, что позволит предварительно оценить не только прогнозируемый уровень интероперабельности систем в их текущей технологической реализации, но и возможности его повышения и локализации „барьеров“. При этом ключевым преимуществом такого подхода является возможность оценить уровень интероперабельности АС САБО до того, как в обеспечение интероперабельности систем и их необходимую адаптацию вложены временные, кадровые, финансовые или иные материальные ресурсы.

Цель организации имитационного моделирования функциональной совместимости АС САБО предполагает обеспечение возможностей многовариантного прогнозирования и автоматизированного оценивания уровня интероперабельности в различных смоделированных сценариях совместного применения систем. Для достижения поставленной цели разработаны специальная унифицированная модель локализации барьеров интероперабельности и технико-методическая база (методическое и экспериментальное программно-математическое обеспечение с соответствующей инструментальной средой) для исследования процессов обеспечения интероперабельности, локализации барьеров, обоснования типовых решений по их преодолению, автоматизации процесса формирования профиля (сводной характеристики) интероперабельности интегрируемых АС САБО, проведения верификации, валидации и тестирования прикладных моделей интероперабельности для конкретных наборов сопрягаемых АС. Указанные результаты сформированы с учетом следующих выработанных решений и положений.

Встречающиеся на практике средства формирования обобщенных интегральных показателей интероперабельности не представительны и не дают качественного объяснения, насколько эффективно взаимодействие АС. Для обоснованного выбора технических решений по обеспечению интероперабельности необходимо глубинное исследование структурно-функциональных свойств, требований назначения, технологических и эксплуатационно-технических характеристик сопрягаемых АС. В этой связи основу предложенной реализации составляет методика применения эталонной модели интероперабельности в соответствии с ГОСТ 55062-2021 (рис. 1) и построения специальной проблемно-ориентированной модели интероперабельности сопрягаемых систем с учетом их конструкторской и нормативной документации, протоколов, стандартов и пр. В развитие регламентируемой стандартом методики предложенная реализация построена на принципе конкретизации модели интероперабельности до уровня проблемно-ориентированной модели за счет конструктивного уточнения ключевых характеристик интероперабельности в конкретных сценариях применения АС САБО.

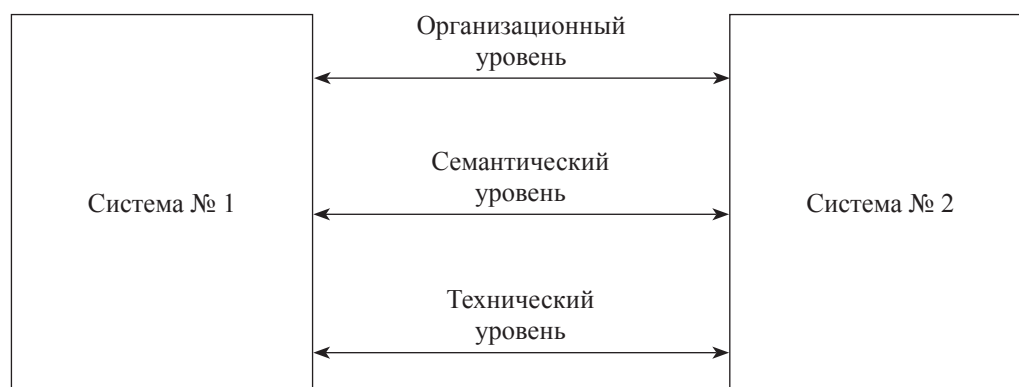


Рис. 1

Уровень интероперабельности необходимо рассматривать для конкретного сценария совместного применения АС исходя из положения, что этот уровень может быть различным в зависимости от целей применения, задействованных компонентов, взаимовлияющих свойств, особенностей технических решений, обрабатываемых и передаваемых видов информации АС, влияющих на их общую функциональную совместимость.

Вследствие особенностей процесса обеспечения функциональной совместимости АС САБО необходимо определить возможные пути ее реализации в условиях наличия гетерогенных унаследованных АС, отсутствия единой нормативной базы и существенного многообразия технических решений и эксплуатационно-технических характеристик АС САБО, полной информацией о которых владеют только разработчики и изготовители систем. Таким образом, автоматизированный анализ и локализация барьеров интероперабельности трудно осуществимы без экспертов: архитекторов, системных аналитиков, ученых в области ее обеспечения, а также технологов самих интегрируемых АС САБО. В этой связи в основу процессов исследования и обеспечения функциональной совместимости АС САБО должны быть положены интеллектуальные технологии, предоставляющие возможности извлечения экспертных знаний и манипулирования ими [9–11]. Так, в частности, интеллектуальная технология обеспечения интероперабельности на основе онтологий представляется весьма перспективной и практически реализуемой [12, 13].

Предложенная модель локализации барьеров интероперабельности должна предоставлять инструментальную среду в общем виде (без привязки к конкретным реализациям сопрягаемых АС) с различными предметно-ориентированными редакторами для разных категорий пользователей (системных аналитиков, экспертов предметной области, технологов АС САБО, операторов самой программы). Это обусловлено необходимостью агрегировать разноаспектные экспертные знания об интегрируемых системах, обеспечивая возможности для прикладного экспериментального моделирования и исследования функциональной совместимости унаследованных

и вновь создаваемых АС САБО. Кроме того, предложенная реализация должна обеспечивать возможности учета состава интегрируемых АС САБО, а также их эксплуатационно-технических характеристик, для чего должна включать инструментальные интерактивные средства описания технологических параметров АС САБО, которые могут быть идентифицированы либо технологами (разработчиками и изготовителями АС), либо взяты из рабочей конструкторской и эксплуатационной документации.

На основе выработанных положений сформированы концептуальная модель локализации барьеров интероперабельности АС САБО и соответствующее технико-методическое обеспечение (рис. 2).

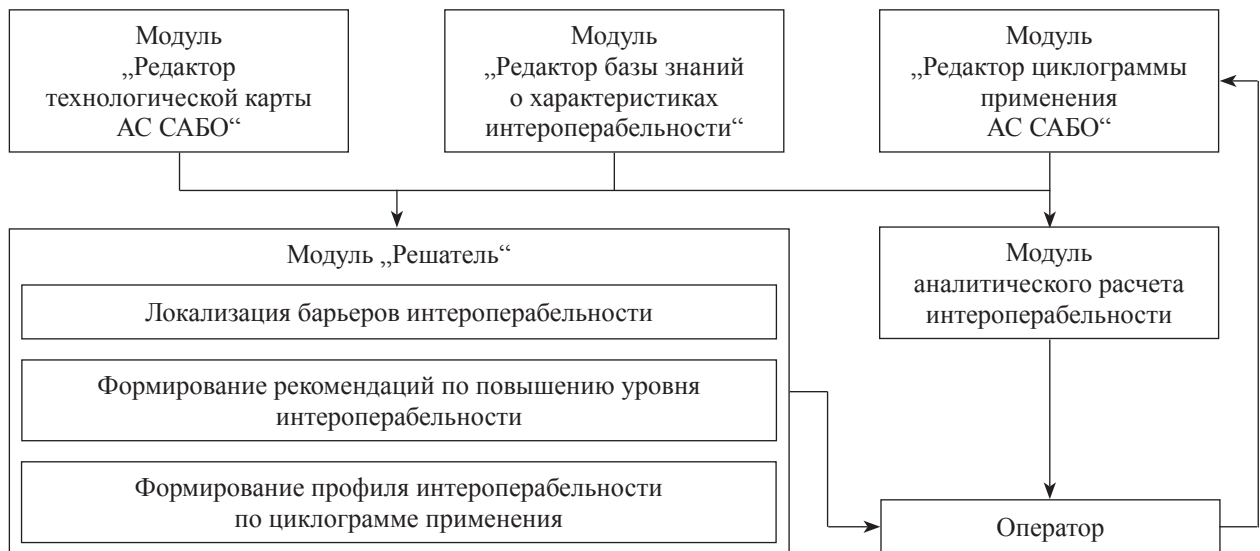


Рис. 2

В ходе экспериментальной реализации предложенного подхода разработаны требования к составу и структуре модели локализации барьеров интероперабельности АС САБО с учетом применения технологий искусственного интеллекта, возможностей масштабирования на принципах открытых систем и возможностей функционирования в отечественной доверенной аппаратно-программной среде. В программной реализации модели созданы функциональные подсистемы интерактивных редакторов баз знаний о характеристиках интероперабельности, аналитического расчета ее уровня, а также решатель, обеспечивающий локализацию барьеров интероперабельности.

В общем случае автоматизированный анализ интероперабельности АС САБО на основе предложенной модели осуществляется в следующем порядке:

- извлечение исходных данных, информации и знаний и формирование проблемно-ориентированной модели интероперабельности для конкретного набора сопрягаемых АС САБО в рамках моделируемого сценария совместного применения;
- валидация, верификация и тестирование модели;
- оценивание общего уровня интероперабельности с локализацией барьеров по заданным экспертным знаниям;
- формирование профиля интероперабельности с рекомендациями по повышению ее уровня;
- анализ результатов имитационного моделирования с последующим уточнением характеристик проблемно-ориентированной модели и повторной ее отработкой на уточненных данных.

Рассмотрим основные компоненты (модули) концептуальной модели локализации барьеров интероперабельности АС САБО (см. рис. 2).

1. *Конфигуратор баз знаний о характеристиках интероперабельности.* Эксперт формирует базу знаний о характеристиках интероперабельности — задает структурно-функциональное

описание модели на основе определения характеристик и технологических (технических) параметров функциональной совместимости АС САБО, функций для их расчета, определения уровней интероперабельности по проблемно-ориентированной модели и их взаимосвязей с учетом требований ГОСТ 55062-2021.

2. *Конфигуратор технологической карты АС.* На данном шаге технолог формирует технологическую карту интегрируемых АС САБО с учетом их эксплуатационно-технических характеристик, руководствуясь конкретными измерениями (значениями параметров) этих характеристик.

3. *Конфигуратор циклограммы применения АС.* На данном шаге оператор задает циклограмму (граф) совместного попарного применения интегрируемых АС САБО с учетом задействованных в ходе их функционирования технологических параметров.

4. *Решатель модели локализации барьеров интероперабельности.* Данный шаг выполняется автоматически и определяется декларативно-процедуральным описанием экспертных знаний в базе знаний. Это означает, что расчеты, выполняемые решателем, полностью зависят от структурно-функциональных и структурно-параметрических связей, задаваемых в редакторе базы знаний (п. 1). По существу, решатель опирается на специализированную модель представления знаний о характеристиках интероперабельности, при этом экспертами задаются:

- проблемно-ориентированная модель интероперабельности;
- модель уровней интероперабельности;
- модель (технологическая карта) интегрируемых АС САБО;
- модель совместного применения интегрируемых АС САБО.

В ходе функционирования решателя выполняется задача структурного распознавания образов — определения состояния (уровня) интероперабельности в объеме допустимых классов состояний и отнесения, на основе исходных данных и правил (знаний экспертов), заданной конфигурации циклограммы применения и технологической карты сопрягаемых АС к тому или иному классу состояний.

5. *Модуль аналитического расчета уровня интероперабельности.* Алгоритм аналитического расчета уровня интероперабельности для сценариев совместного применения АС САБО базируется на методике, предполагающей количественное интегральное оценивание данного уровня совместно применяемых систем.

Рассмотрим процессы тестирования, верификации и валидации модели интероперабельности. Процедура тестирования заключается в итеративном процессе уточнения параметров модели интероперабельности, модели ее уровней и технологической карты, циклограммы совместного применения АС САБО. Изменение значений соответствующих параметров и последующее наблюдение вычисляемых результатов, а также формируемых решателем выводов — это основной процесс тестирования исходных данных и знаний о функциональной совместимости сопрягаемых систем, а также о возможных путях обеспечения их функциональной совместимости. Основная цель такого тестирования заключается в поиске изменяемого набора значений технологических параметров АС (и соответственно их эксплуатационно-технических характеристик), который с минимальными допустимыми издержками позволит достичь целевого уровня интероперабельности интегрируемых систем. Процедура валидации заключается в системном контроле семантической и прагматической структуры формируемых моделей. Примерами валидации могут служить контроль структуры проблемно-ориентированной модели, контроль корректности выбора ее характеристик и нормативной базы для модели интероперабельности, контроль корректности выбора критериев определения уровней интероперабельности, контроль корректности указания значений технологических параметров, контроль корректности формирования циклограммы совместного применения АС САБО и т. д. Процесс верификации — это процедуры, которые могут быть выполнены автоматизированным способом на модельно-алгоритмическом уровне программной реализации модели локализации барьеров интероперабельности АС САБО. Содержание таких процедур связано с проверкой полноты, замкнутости и непротиворечивости формируемых моделей [14].

Формирование профиля интероперабельности — важное приложение процесса поддержки принятия решений по обеспечению функциональной совместимости интегрируемых АС САБО. Информация, агрегируемая в профиле, является по существу набором рекомендаций разработчикам и изготовителям АС САБО о возможных способах модернизации систем для обеспечения целевого уровня функциональной совместимости. Для унифицированного формирования профиля интероперабельности следует:

- автоматизировать процессы формирования проблемно-ориентированных моделей интероперабельности на основе экспертных знаний — создать программную платформу, базирующуюся на специальных моделях представления знаний;

- создать и внедрить автоматизированные средства сбора технологических данных об эксплуатационно-технических характеристиках и технических решениях, реализуемых в создаваемых АС САБО;

- создать интеллектуальную программную систему анализа функциональной совместимости интегрируемых АС САБО, включающую средства формирования информационных материалов в профиль интероперабельности;

- интерпретировать создаваемые профили не как унифицированные информационные структуры, а учитывая только их прикладное значение для конкретных сценариев совместного применения интегрируемых АС САБО.

Автоматизация анализа интероперабельности АС САБО является важной задачей в обеспечении интегрированного проактивного мониторинга состояния САБО, так как от уровня интероперабельности интегрируемых систем зависит полнота и качество оценивания и прогнозирования состояний САБО, эффективность совместного применения элементов, составляющих САБО, и в конечном счете показатели производства сельскохозяйственной продукции САБО.

Научная и техническая новизна представленных результатов заключается в создании уникальной технико-методической базы автоматизации анализа интероперабельности АС САБО на основе применения интеллектуальных технологий манипулирования проблемно-ориентированными экспертными знаниями о сопрягаемых АС САБО.

Полученные результаты могут быть использованы для экспериментального моделирования функциональной совместимости сопрягаемых унаследованных и создаваемых перспективных АС, а также для совершенствования и масштабирования сформированной технико-методической базы в целях создания унифицированной интеллектуальной программной платформы моделирования интероперабельности и поддержки принятия решения по ее обеспечению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Предложения по наборам метаданных для научных информационных ресурсов / М. В. Кулагин, В. А. Серебряков, А. А. Бездушный, А. К. Нестеренко, Т. М. Сысоев // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10, вып. 7. С. 29–48.
2. Калинин В. Н. Теоретические основы системных исследований. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. 293 с.
3. Данеев А. В., Воробьев А. А., Лебедев Д. М. Исследование динамики поведения сложных организационно-технических систем в условиях воздействия неблагоприятных факторов // Вестн. Воронеж. института МВД России. 2010. Вып. № 2. С. 163–171.
4. Каргин В. А., Майданович О. В., Охтилев М. Ю. Автоматизированная система информационной поддержки принятия решений по контролю в реальном времени состояния ракетно-космической техники // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 11. С. 20–23.
5. Крылов А. В., Охтилев П. А., Бахмут А. Д. Использование прецедентной методологии при построении экспертных систем управления сложными организационно-техническими объектами // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. Ч. II. Технические науки. СПб: ГУАП, 2017. С. 255–261.
6. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Новые информационные технологии мониторинга и управления состояниями сложных технических объектов в реальном масштабе времени // Тр. СПИИРАН. 2005. С. 249–265.
7. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Теоретические и прикладные проблемы разработки и применения автоматизированных систем мониторинга состояния сложных технических объектов // Тр. СПИИРАН. 2002. Т. 1, вып. 1. С. 167–180.

8. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
9. Гаврилова Т. А., Кудрявцев Д. В., Муромцев Д. И. Инженерия знаний. Модели и методы. СПб: Лань, 2016. 324 с.
10. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер, 2000. 384 с.
11. Люггер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии методы решения сложных проблем: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2003. 864 с.
12. Боргест Н. М. Онтология проектирования: теоретические основы. Ч. 1. Понятия и принципы: Учеб. пособие. Самара: Изд-во СТАУ, 2010. 92 с.
13. Левашова Т. В. Принципы управления онтологиями, используемые в среде интеграции знаний// Тр. СПИИРАН. 2002. Т. 2, вып. 1. С. 51–68.
14. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Применение алгебраического подхода в квалиметрии моделей и полимодельных комплексов // Сб. докл. VI науч.-практ. конф. „Имитационное моделирование. Теория и практика“. Казань: Изд-во „Фэн“, 2013. Т. 1. С. 68–79.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Владимирович Соколов

— д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; гл. научный сотрудник; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Павел Алексеевич Охтилев

— канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; мл. научный сотрудник; E-mail: pavel.oxt@mail.ru

Поступила в редакцию 23.07.24; одобрена после рецензирования 30.07.24; принята к публикации 23.09.24.

REFERENCES

1. Kulagin M.V., Serebryakov V.A., Bezdushny A.A., Nesterenko A.K., Sysoev T.M. *Computational Technologies*, 2005, no. 7(10), pp. 29–48. (in Russ.)
2. Kalinin V.N. *Teoreticheskiye osnovy sistemnykh issledovaniy* (Theoretical Foundations of Systems Research), St. Petersburg, 2016, 293 p. (in Russ.)
3. Daneev A.V., Vorob'ev A.A., Lebedev D.M. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*, 2010, no. 2, pp. 163–171. (in Russ.)
4. Kargin V.A., Maydanovich O.V., Okhtilev M.Yu. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, no. 11(53), pp. 20–23. (in Russ.)
5. Krylov A.V., Okhtilev P.A., Bakmut A.D. *Scientific session of GUAP: Collection of reports. Part II. Technical sciences*, St. Petersburg, 2017, pp. 255–261. (in Russ.)
6. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2005, no. 2(2), pp. 249–265. (in Russ.)
7. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2002, no. 1(1), pp. 167–180. (in Russ.)
8. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh ob'yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
9. Gavrilova T.A., Kudryavtsev D.V., Muromtsev D.I. *Inzheneriya znaniy. Modeli i metody* (Knowledge Engineering. Models and Methods), St. Petersburg, 2016, 324 p. (in Russ.)
10. Gavrilova T.A., Khoroshevsky V.F. *Bazy znaniy intellektual'nykh system* (Knowledge Bases of Intelligent Systems), St. Petersburg, 2000, 384 p. (in Russ.)
11. Luger G.F. *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, Pearson, 2008, 784 p.
12. Borgest N.M. *Ontologiya proyektirovaniya: teoreticheskiye osnovy. Chast' 1. Ponyatiya i printsipy* (Ontology of Design: Theoretical Foundations. Part 1. Concepts and Principles), Samara, 2010, 92 p. (in Russ.)
13. Levashova T.V. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2002, no. 1(2), pp. 51–68. (in Russ.)
14. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika* (Simulation Modeling. Theory and Practice), Collection of reports of the VI scientific and practical conference, Kazan, 2013, vol. 1, pp. 68–79. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Boris V. Sokolov

— Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, Chief Researcher; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Pavel A. Okhtilev

— PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, Junior Researcher; E-mail: pavel.oxt@mail.ru

Received 23.07.24; approved after reviewing 30.07.24; accepted for publication 23.09.24.