

На правах рукописи



ГЛУХИХ ДМИТРИЙ ИГОРЕВИЧ

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ**

**Специальность: 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Тюмень – 2025

Работа выполнена на кафедрах информационных систем и программного обеспечения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет» (ФГАОУ ВО «ТюмГУ»)

Научный руководитель: Захарова Ирина Гелиевна,

кандидат физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры программного обеспечения
ФГАОУ ВО «Тюменский государственный универ-
ситет»

**Официальные
оппоненты:**

Лавров Владислав Васильевич,

доктор технических наук, доцент, Федеральное
государственное автономное образовательное учреж-
дение высшего образования «Уральский федераль-
ный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», профессор кафедры теплофизики
и информатики в металлургии

Кувайскова Юлия Евгеньевна,

кандидат технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное учре-
ждение высшего образования «Ульяновский госу-
дарственный технический университет», доцент,
заведующий кафедрой прикладной математики и ин-
форматики

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образова-
тельное учреждение высшего образования «Тюмен-
ский индустриальный университет» (г. Тюмень)

Защита состоится «25» июня 2025 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертаци-
онного совета 24.2.418.03 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный уни-
верситет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, ауд. 410.

Телефон: 8-932-32-000-36

E-mail: d.i.glukhikh@utmn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном
центре ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» и на сайте
<https://diss.utmn.ru/sovet/diss-sovet-212-274-14/zashchita/1263259>.

Автореферат разослан «____» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.418.03
к. т. н., доцент

A.A. Оленников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Уровень цифровизации объектов современного производства и инфраструктуры позволяет переходить от задач сбора данных, прогнозирования событий и обнаружения нежелательных ситуаций к задачам интеллектуальной поддержки принятия своевременных решений в обнаруженных проблемных ситуациях.

Особенно актуально внедрение систем поддержки принятия решений (СППР) для сложных технологических объектов, где возникновение нештатных ситуаций несет за собой риски катастроф или иных серьезных экономических, экологических, социальных последствий. Примерами таких объектов являются системы обеспечивающих предприятий городской инфраструктуры (тепло-, водо-, газо-, энергоснабжение), объекты производства, объекты энергетики.

В условиях городской среды принятие решений для предотвращения нежелательных ситуаций и их последствий должно проводиться как с учетом состояния самого ТО, так и с учетом его окружения, наличием ограничений и взаимосвязей с другими объектами города, а также состоянием обеспечивающих систем.

Таким образом, возникает комплексный, неоднородный и динамично меняющийся объект мониторинга (ОМ) с многообразием связей и состояний внутренней и внешней среды.

Согласно характеристикам сложного объекта, сформулированными Д.А. Поспеловым в методе ситуационного управления, такой ОМ относится к категории сложных, а его исследование требует привлечения методов математического моделирования и современных технологий анализа данных.

Многообразие окружения, динамичность состояний компонентов ОМ приводит к тому, что значительный объем данных необходимо анализировать, систематизировать и далее использовать для обеспечения принятия решений. В итоге, задачи внедрения инструментария прикладных интеллектуальных систем поддержки принятия решений имеют высокую трудоемкость и научность, что тормозит их решение в реальных условиях.

В силу этой трудоемкости, несмотря на широкое применение методов и средств прогнозной аналитики, мониторинга описанных сложных технологических объектов (СТО), остаются открытыми

вопросы создания систем интеллектуальной поддержки принятия решений (ИСППР), которые имеют возможность генерировать обоснованные варианты разрешения нежелательных ситуаций и помогать при исполнении решений. В то же время возможности математического моделирования, а также современное состояние технологий, уровень цифровизации процессов, в том числе, систем сбора и аналитики данных, необходимых для реализации таких моделей, позволяют уже сегодня переходить к созданию таких ИСППР.

Для создания ИСППР в системах сложных технологических объектов необходима интеграция разных методов искусственного интеллекта, что дает возможность объединить преимущества систем на основе машинного обучения, так и систем, основанных на знаниях. Это позволит преодолеть такие трудности, как отсутствие необходимых объемов обучающих данных, слабая формализуемость и сложность формирования строгих математических критериев и целевых функций для принятия решений на сложных объектах. Необходим гибридный подход. В качестве базы рассматривается метод рассуждения на основе прецедентов (case-based reasoning, CBR), один из наиболее известных и результативных методов искусственного интеллекта. Предлагаемый гибридный метод потенциально позволяет устраниТЬ ограничения разделного применения систем, основанных на знаниях (требуют трудоемкой работы по выявлению и формализации знаний) и методов машинного обучения (требуют большие объемы обучающих примеров).

Степень разработанности темы. Исследованиям в области математического моделирования, формализации состояния технологических объектов посвящены работы следующих авторов: А.Ф. Антипин, В. К. Битюков, В. С. Кудряшов, М. В. Алексеев, Д. П. Лашенов, В. Л. Бурковский, Т. Н. Караневская, А. Г. Шумихин. В работах используются подходы к моделированию объекта с помощью уравнений, структурных моделей. Исследования в области разработки СППР, прогнозирования и классификации состояний для технических, технологических объектов посвящены работы следующих ученых: Поспелов Д.А., Охтилев М.Ю., Спирин Н.А., Онорин О.П., Лавров В.В., Кувайскова Ю.Е., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Исследователи предлагают концепции СППР на основе знаний, математических моделей машинного обучения для прогнозирования

состояний объектов. Исследованиям в области применения метода рассуждения на основе прецедентов для интеллектуальных СПР посвящены работы следующих исследователей: Карпов Л.Е., Юдин В.Н., Еремеев А.П., Варшавский П.Р., Юрин А.Ю., Кузяков О.Н., Aamodt A., Pinar Öztürk, Ramon López de Mántaras, Rosina Weber, Ian Watson. В рамках реализации цикла CBR можно отметить работы, связанные с интегративным подходом разных моделей следующих авторов: Грибова В.В., Eoin M. Kenny, Bjorn Magnus Mathisen, Maximilian Hoffmann, Agnar Aamodt и др. Для управления технологическими объектами известны системы: IBM Watson, SAS Decision Manager, AnyLogic, а также отечественные системы корпораций Газпромнефть, Роснефть, Алроса, Северсталь и другие.

Однако остаются открытыми вопросы математического моделирования и алгоритмического обеспечения ИССПР для сложных технологических объектов, где необходимо учитывать мультимодальные данные от компонентов, контекст (условия в которых эксплуатируется объект в момент принятия решения), а также брать во внимание возможность недостатка обучающих данных, неопределенность состояний.

В контексте актуальной проблемы необходимого повышения оперативности и адекватности принятия решения по корректировке/восстановлению работоспособности в процессе эксплуатации СТО на основе анализа разработанности темы соискателем поставлена научная задача. **Научная задача**, решаемая в диссертации, заключается в разработке методов и алгоритмов для задач интеллектуальных систем поддержки принятия решений, а также разработке комплекса программ – Платформы для быстрой сборки интеллектуальных систем поддержки принятия решений, реализующего предложенные методы и алгоритмы. Ее решение имеет научную и практическую ценность для построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений при эксплуатации сложных технологических объектов, для которых значимы оценка комплексной ситуации на объекте с учетом контекста и быстрая выдача решения.

Объект исследования: математическое моделирование состояний сложного технологического объекта.

Предмет исследования: методы моделирования состояний сложных технологических объектов в интеллектуальных системах

поддержки принятия решений; метод рассуждения на основе прецедентов в задачах поддержки принятия решений; нейросетевой подход для выбора решения; алгоритмы генерации обучающих множеств; алгоритмы адаптации решений.

Цель диссертационной работы: разработка, исследование и программная реализация моделей и алгоритмов для обеспечения быстрой выдачи, интерпретируемости и аргументированности рекомендаций в системах поддержки принятия решений на сложных технологических объектах.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель ситуации на сложном технологическом объекте;
2. Разработать и исследовать методы моделирования процесса принятия решения и алгоритмы построения и выдачи решения, отнесенного с конкретным набором состояний компонентов сложного технологического объекта;
3. Реализовать разработанные методы и алгоритмы в виде программного комплекса: Платформы для быстрой сборки интеллектуальных систем поддержки принятия решений;
4. Провести апробацию Платформы на примере тестовых сборок для сложных технологических объектов: тепловой пункт, умная ферма, понижающая электроподстанция.

Научная новизна:

1. Разработан метод математического моделирования ситуаций на сложных технологических объектах, отличающийся новым способом представления ситуации через состояния компонентов объекта и его контекста в виде векторов состояний, что позволяет единообразно представить различную информацию, поступающую от компонентов, для моделирования комплексной ситуации на объекте с учетом контекста и осуществлять отбор прецедента из базы знаний в едином пространстве состояний с инвариантной относительно компонентов метрикой (п. 6).

2. Разработан численный метод моделирования построения решения на базе гибридного метода рассуждения на основе прецедентов, отличающийся совместным использованием систем, основанных на знаниях, и методов машинного обучения, что позволяет

устранить ограничения раздельного применения этих подходов: системы, основанные на знаниях требуют трудоемкой работы по выявлению и формализации знаний; методы машинного обучения требуют большие объемы обучающих примеров (п. 2).

3. Разработан алгоритм сборки и адаптации решения, отличающийся применением разработанного метода моделирования состояний сложных технологических объектов. Алгоритм позволяет в случае отсутствия в базе знаний подходящего решения на основе имеющихся прецедентов синтезировать новое решение путем сборки решения из имеющихся в базе элементных преобразований состояний компонентов объекта и последовательностей таких преобразований (п. 8).

4. Разработан комплекс программ, реализованный в виде Платформы для быстрой сборки интеллектуальных систем поддержки принятия решений, отличающейся микроядерной архитектурой, в частности, составом модулей и их взаимодействием, что позволяет собирать и настраивать из готовых модулей предметно-ориентированную ИСППР и осуществлять поддержку принятия решений в ходе эксплуатации на основе гибридного метода рассуждения на основе прецедентов (п. 3).

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке: понятия сложного технологического объекта, объединяющего в себе предопределенные связи и состояния не только технологических компонентов, но и персонала, зданий и сооружений, подъездных путей и окружающей среды; понятие ситуации на сложном технологическом объекте, определяемое набором состояний компонентов объекта; метода моделирования состояний сложных технологических объектов, позволяющего единообразно формализовать различную информацию от разнородных элементов; метода гибридного рассуждения на основе прецедентов, позволяющего устраниить ограничения раздельного применения систем, основанных на знаниях (требуют трудоемкой работы по выявлению и формализации знаний) и методов машинного обучения (требуют большие объемы обучающих примеров).

Практическая значимость диссертации заключается в разработке комплекса программ – Платформы для быстрой сборки интеллектуальных систем поддержки принятия решений, реализующего

предложенные методы и алгоритмы и позволяющего собирать и настраивать из готовых модулей предметно-ориентированную ИСППР для технологических объектов, для которых значимы оценка комплексной ситуации на объекте с учетом контекста и быстрая выдача решения.

Методы исследования. Для решения задач использованы методы математического моделирования, инженерии знаний, машинного и глубокого обучения, метод рассуждения на основе прецедентов, методы оптимизации, методы объектно-ориентированного программирования, методы проектирования программных комплексов (микроядерная архитектура).

Положения, выносимые на защиту

1. Метод математического моделирования ситуации на сложном технологическом объекте, которая описывается совокупностью состояний компонентов объекта и его контекста в виде векторов состояний.

2. Численный метод моделирования процесса построения решения при эксплуатации сложного технологического объекта на базе гибридного метода рассуждения на основе прецедентов, включая обучающую функцию определения схожести.

3. Алгоритм сборки и адаптации решения на основе имеющихся прецедентов в базе знаний.

4. Платформа для быстрой сборки интеллектуальных систем поддержки принятия решений, позволяющая собирать и настраивать из готовых модулей предметно-ориентированную ИСППР, функционирующую на основе разработанных методов и алгоритмов, включая алгоритм генерации обучающих множеств.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности определяется содержанием основных научных результатов исследования по следующим составляющим специальности: математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Соответствие пунктам паспорта специальности:

П2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий: для эффективного построения решения в ИСППР на сложном технологическом объекте разработан, обоснован

и протестирован численный метод моделирования процесса построения решения на базе гибридного метода рассуждения на основе прецедентов, включая алгоритм сборки и адаптации решения на основе имеющихся прецедентов в базе знаний. Метод реализуется с применением современных компьютерных технологий (искусственные нейронные сети, в том числе, на основе предобученных моделей компьютерного зрения).

П3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента: предложенные методы и алгоритмы реализованы в виде комплекса программ, на базе которого проведены вычислительные эксперименты по оценке эффективности разработанного алгоритмического обеспечения и возможности его практического использования для решения поставленных задач.

П6. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей: для анализа ситуации на сложном технологическом объекте разработан метод математического моделирования ситуации на таком объекте. Анализ соответствующей математической модели ситуации на объекте позволяет реализовать компьютерное моделирование процесса построения решения.

П8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента: в рамках исследования научно-технической проблемы разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений для технологических объектов разработан современный метод математического моделирования ситуации на сложном технологическом объекте, включающий в себя совместное использование знаний и методов машинного обучения. Разработаны алгоритмы сборки и адаптации решения, генерации обучающих множеств, решающие актуальные научно-технические проблемы недостатка знаний. Проведены вычислительные эксперименты.

По теме диссертационного исследования опубликовано 18 работ, в том числе: 8 в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ; 4 в научных журналах, индексируемых в Scopus, 3 в материалах конференций, индексируемых в Scopus, 3 в материалах конференций,

индексируемых в РИНЦ. Получено 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Степень достоверности результатов. Результаты работы согласуются с результатами известных работ в области ситуационного управления и разработки ИСППР, опубликованных другими отечественными и зарубежными исследователями. Для обучения моделей машинного обучения использовались необходимые объемы данных, для оценки качества моделей машинного обучения использованы известные метрики. В ходе апробации метода моделирования процесса построения решения были привлечены эксперты.

Апробация работы.

Основные результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, были представлены в виде докладов на следующих конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и интеллектуальные системы принятия решений» (ITIDMS 2021). Место проведения РосНОУ, ул. Радио, 22, Москва (2021).
- X Научно-практическая конференция БРД «Газпром нефть». 2021. Место проведения: ООО Газпромнефть Научно-технический Центр, Набережная реки Мойки, д. 75-79, лит Д, г. Санкт-Петербург (2021).
- 2nd International Conference on Data Science and Applications (ICDSA 2021). Место проведения: School of mobile computing and communication, Jadavpur university, Kolkata, India (2021).
- Математическое и информационное моделирование. Место проведения: ТюмГУ, Тюмень (2023).
- Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании Место проведения: Институт геологии и нефтегазодобычи, ТИУ, Тюмень (2022, 2024).
- International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI). Место проведения: Харбин, Китай (2024).

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 23 рисунков, 4 таблицы, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 121 наименований и 4 приложений на 38 страницах.

Сведения о личном вкладе автора. Формулировка народно-хозяйственной проблемы, постановка научной задачи, содержание диссертации и все представленные в ней результаты получены лично автором. Подготовка к публикации некоторых научных статей, а также получение и регистрация результатов интеллектуальной деятельности проводились совместно с соавторами, вклад диссертанта определяющий.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, приведены основные научные положения и результаты.

В первой главе рассмотрены ключевые направления исследований и прикладных разработок в области принятия решения на основе мониторинга опасных ситуаций, проведен анализ литературы. Сформулированы особенности функционирования технологического объекта в условиях городской среды. Введено *определение*: сложный технологический объект – комплексный, неоднородный и динамично меняющийся объект мониторинга со множеством предопределенных связей и состояний технологических компонентов и окружающей среды.

Проведен анализ исследований. Исследованиям в области математического моделирования, формализации состояния технологических объектов посвящены работы следующих авторов: А.Ф. Антипин, В. К. Битюков, В. С. Кудряшов, М. В. Алексеев, Д. П. Лашенов, В. Л. Бурковский, Т. Н. Карапаневская, А. Г. Шумихин. В работах используются подходы к моделированию объекта с помощью уравнений, структурных моделей. Исследования в области разработки СППР для технологических объектов посвящены работы следующих ученых: Поспелов Д.А., Охтилев М.Ю., Спирина Н. А., Онорин О.П., Лавров В.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Исследователи предлагают концепции СППР на основе знаний, математических моделей для прогнозирования состояний.

Проведен анализ существующих систем поддержки принятия решения на технологическом объекте.

Выделены основные направления научно-прикладных исследований в области интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР). В частности, перспективным направлением

определенено совместное использование инженерии знаний и методов машинного обучения. Основной для этого совместного использования предложен метод рассуждения на основе прецедентов (CBR). В рамках реализации цикла CBR можно отметить работы, связанные с интегративным подходом разных моделей следующих авторов: Грибова В.В., Eoin M. Kenny, Bjorn Magnus Mathisen, Maximilian Hoffmann, Agnar Aamodt и др.:

Сформулированы три ключевые задачи реализации CBR-цикла в рамках ИСППР: формализация ситуации, оценка схожести ситуации, адаптация решения. Проанализированы методы их решения.

На основе проведенного обзора сформулированы цели и задачи настоящей диссертационной работы.

Во второй главе проведено концептуальное моделирование сложного технологического объекта городской инфраструктуры, в результате построена математическая модель сложного технологического объекта, модель ситуации на сложном технологическом объекте, модель представления прецедентов в ситуационной базе знаний. Введено определение ситуации на сложном технологическом объекте. Представлен численный метод моделирования процесса построения решения.

В пункте 2.1 представлен анализ систем городской инфраструктуры. Сделан вывод, что сложный технологический объект состоит из различного оборудования, обслуживается персоналом и находится под различным воздействием окружающей среды. Такие объекты расположены стационарно, имеют определенные режимы эксплуатации, порядок эксплуатации. Они не возникают спонтанно. Для объектов описаны штатные и нештатные ситуации.

В пункте 2.2 представлена математическая модель сложного технологического объекта.

Структура сложного технологического объекта содержит в себе элементы различного типа. «Оборудование» – элементы технологического оборудования, состояние которых определяет функционирование самого технологического объекта, его способность выполнять назначенные функции с заданным качеством и требованиями. «Операционное окружение» – элементы организационных и организационно-технических систем, влияющие на эксплуатацию, обслуживание,

ремонт или смену технологического оборудования. «Контекст» – элементы окружающей среды, инфраструктуры, которые могут влиять на состояния и действия оборудования или операционного окружения, но на которые влиять нельзя.

Далее будем рассматривать сложный технологический объект как совокупность элементов О разной природы, которые могут находиться в различных состояниях S:

$$\text{СТО} = \langle O, S \rangle,$$

где $O = \{O_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ – множество элементов сложного объекта, в котором можно выделить не пересекающиеся подмножества, характеризующие технологические компоненты (Оборудование, Операционное окружение) и окружающую среду (Контекст); $S = \{S_j | j = 1, 2, \dots, M\}$ – множество возможных состояний.

Каждый из элементов O_i может находиться в некотором состоянии S_i , принадлежащему множеству возможных состояний этого элемента:

$$O_i \rightarrow S_i,$$

где $S_i = (p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^{m_i}) = \{p_i^k\}_{k=1}^{m_i}$, при $m_i > 1$ – число классов (возможных состояний) для каждого элемента O_i , $p_i \in \{0,1\}$ – степень уверенности принадлежности к классу (вероятность нахождения в определенном состоянии). Для частного случая неопределенности $p_i \in [0,1]$.

Введем *ключевое определение* для математического моделирования: *ситуация на сложном технологическом объекте* есть совокупность состояний, в которых находятся элементы множества O.

$$\text{Sit} \rightarrow \check{S} = (S_1, S_2, \dots, S_N) = \{S_i^k\}_{k=1}^N \text{ длиной } \sum_{i=1}^N m_i.$$

Ситуация в пространстве состояний Sit характеризуется кортежем векторов S_i , образующим вектор \check{S} . Пример ситуации на СТО «умная ферма» представлена в п. 2.2.

В пункте 2.3 представлена модель представления прецедентов в ситуационной базе знаний.

Положим, что целью принятия решения при возникновении текущей проблемной ситуации Sit_{act} является перевод ее в целевую ситуацию Sit_{end} . Далее для упрощения мы полагаем, что целевая ситуация одинакова для всех возможных входных ситуаций и соответствует тому случаю, когда все элементы технологического

объекта и связи между ними находятся в исправных, работоспособных состояниях. В общем случае этот перевод Sit_{act} в Sit_{end} является многошаговым дискретным процессом смены состояний элементов. Допустим, что каждой смене элементарного состояния соответствует некоторое действие в системе. Тогда последовательность мультивекторов $\check{S}^0, \check{S}^1, \dots, \check{S}^k, \dots, \check{S}^{k_end}$, где

$$\begin{aligned} Sit_{act} &\rightarrow \check{S}^0, \\ Sit_{end} &\rightarrow \check{S}^{k_end} \end{aligned}$$

будет однозначно представлять программу действий, преобразующих входную проблемную ситуацию в целевую.

Обозначим эту последовательность:

$$R^\gamma = (\check{S}^0, \check{S}^1, \dots, \check{S}^k, \dots, \check{S}^{k_end}),$$

где γ – как и ранее есть все множество значений индекса k и $\check{S}^{k-1} \neq \check{S}^k$ для всех k .

Таким образом, R^γ также является вектором с дополнительной осью измерений.

Мультивектор R^γ есть формальное представление решения Sol некоторой ситуации Sit^γ .

Введем определение: *Решение* – инструкция по переводу объекта из критической ситуации в целевую исправную, которая описывается последовательностью векторов R^γ .

Полагаем, что в базе прецедентов представлены последовательности R для некоторого количества m ситуаций Sit .

В пункте 2.4 представлен численный метод моделирования построения решения. Для компьютерного моделирования процесса построения решения разработан метод построения решения на базе гибридного метода рассуждения на основе прецедентов.

1 этап. Сбор и анализ данных.

Задача: получение вероятностного вектора состояния каждого элемента.

Для каждого элемента O_i используется свой классификатор K_i из репозитория моделей классификаторов, Классификатор возвращает вероятность принадлежности классам состояний на основе полученных данных X_i , что и определяет вероятностный вектор состояния $S_{i\ act}$.

$$K_i: X_i \xrightarrow{K_i} S_{i\ act},$$

где $S_{i\ act} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im_i}) = \{p_i^k\}_{k=1}^{m_i}$, при $m_i > 1$ – число классов (возможных состояний) для каждого элемента O_i , $p_i \in [0,1]$ – вероятность принадлежности к классу (вероятность нахождения в определенном состоянии).

При этом в зависимости от имеющихся данных и степени неопределенности в качестве классификатора могут использоваться как модели машинного обучения, так и функции, основанные на экспертных знаниях.

2 этап. Идентификация ситуации.

Задача: классификация комплексной ситуации для выявления нежелательной ситуации (требует принятия мер).

Вектора актуальных состояний формирует вектор актуальной комплексной ситуации S_{act} на объекте:

$$S_{it} \rightarrow \check{S}_{act} = (S_{1\ act}, S_{2\ act}, \dots, S_{N\ act}) = \{S_{i\ act}^k\}_{k=1}^N \text{ длиной } \sum_{i=1}^N m_i$$

Определение класса ситуации:

$$s: \check{S}_{act} \rightarrow C, \text{ где } C = \{0,1\},$$

s – функция модуля идентификации.

В зависимости от имеющихся данных, экспертных правил определения нежелательной ситуации в качестве функции s могут использоваться как модели машинного обучения, так и функции систем, основанных на экспертных правилах. С точки зрения практического использования допустимо ограничиться решением задачи бинарной классификации, это позволяет сразу отбросить ситуации, не требующие принятия мер.

3 этап. Отбор ситуаций из базы знаний.

Задача: извлечь из базы знаний набор ситуаций в заданном количестве M , отсортированных по степени схожести Sim . Для этого вводится функция схожести f .

Используется модель оценки схожести, основанная на использовании функции f оценки схожести, возвращающей количественную оценку схожести похожести ситуаций $Sim \in [0,1]$.

$$f(\check{S}_{act} \cdot \check{S}_z) = Sim,$$

где $\check{S}_z = \{S_{iz}\}_{i=1}^N$ вектор, описывающий комплексную ситуацию z из БЗ при $\{z_i^k\}_{k=1}^{m_i}$, $z_i \in \{0, 1\}$ – значение принадлежности к классу (нахождение в определенном состоянии).

Аналогично этапу 2 в зависимости от имеющихся данных и степени неопределенности могут использоваться для определения этой функции как техники систем, основанных на знаниях, так и техники машинного обучения, в том числе, *обучаемая функция выбора ситуации на основе схожести, приведенная* в 3 главе, пункт 3.1.

4 этап. Формирование решения по базе знаний.

Цель этапа: выдача решения адресатам.

С помощью модуля отбора решений из базы знаний выбирается по критерию $f(Sit_{act}, Sit_z) \rightarrow \max$ наиболее сходная ситуация Sit^* , и при выполнении условия $f(Sit_{act}, Sit^*) \geq Th^1$ ее решение из пары $\langle Sit^*, Sol^* \rangle$ выдается адресатам – пользователям системы.

Если это условие не выполняется, модуль поиска и адаптации решений выполняет задачи преобразования решений из базы знаний для их использования в новой ситуации. Формируется цепочка – последовательность преобразований из заданной ситуации в конечную. Используется алгоритм, представленный в главе 3, пункт 3.2.

В третьей главе приведены алгоритмы, необходимые для реализации метода моделирования процесса построения решения на базе гибридного метода рассуждения на основе прецедентов. В пункте 3.1 представлена обучаемая функция выбора ситуации на основе схожести, поставлена задача оптимизации архитектуры обучаемой функции выбора на основе нейросетевой модели, приведен алгоритм оптимизации архитектуры нейросетевой модели. В пункте 3.2 сформулирована задача преобразования решений из базы знаний для их использования в новой ситуации, приведен алгоритм поэлементного синтеза (сборки) решения.

В пункте 3.1 представлена обучаемая функция выбора ситуации на основе схожести.

Оценка похожести ситуаций является ключевой задачей при реализации метода CBR.

¹ Определяется экспертной оценкой.

Для количественной оценки похожести вводится так называемая Similarity-функция Sim. Для заданной Sit в базе прецедентов нужно найти такую Sit*, которая обеспечит наибольшее значение Sim (Sit*, Sit) по сравнению с остальными. Но на практике более целесообразно определить подмножество схожих ситуаций:

$$\Theta = \{ \text{Sit}_z | z = 1, 2, 3, \dots, Z \},$$

где Z – число ситуаций-примеров в БЗ такой Sit*, что $\text{Sim}(\text{Sit}_{\text{act}}, \text{Sit}_z) > \text{Th}$.

$$\text{Sim}(\text{Sit}_{\text{act}}, \text{Sit}_z) \rightarrow \max$$

Вычисление similarity-функции может быть выполнено на основе метрик – путем вычисления расстояния между ситуациями в пространстве атрибутов, которыми эти ситуации описываются.

Более точное вычисление Sim с помощью метрик обладает гораздо большей гибкостью, позволяет отвечать не только на вопросы вида «Насколько ситуация А похожа на ситуацию В?» или «Какая из ситуаций В или С более похожа на А?». Таким образом, есть возможность отбора множества конкурирующих допустимых решений и дальнейшего выбора по дополнительным критериям (например, по критерию затрат на реализацию решения).

В случае сложных технологических объектов с мультимодальными исходными данными возникает ряд трудностей:

- Необходимость создания локальных метрик схожести и их агрегирование в глобальные метрики.
- Необходимость экспертной оценки при ранжировании важности атрибутов для конкретной ситуации.
- Необходимость выявления *коллизий*, т.е. случаев, когда различие ситуаций по одним атрибутам (локальным метрикам) может компенсироваться их сходством по другим атрибутам.

Предполагается, применение моделей машинного обучения – потенциально более гибкий подход, который позволит учесть трудноформализуемые знания экспертов с меньшими трудозатратами.

Обобщенная математическая модель, отражающая последовательность преобразований входного набора данных в многослойной нейронной сети, может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Sim}(\text{Sit}_{\text{act}}, \text{Sit}_z) &= f_n(W_n, (f_{n-1}(W_{n-1}, (\dots, f_1(W_1, X_{\text{input}})))), \\ \text{при } W &= A(L, (y, y_{\text{pred}})) \\ W &\in R^{mk \times dk}, \end{aligned}$$

где W – обукаемые параметры (веса);

$\{f_p | p = 1, 2, 3, \dots\}$ – множество функций активации;

$L \in \{L_p | p = 1, 2, 3, \dots\}$ – множество функций потерь;

$n \in \{n_p | p = 1, 2, 3, \dots\}$ – число слоев;

y, Y_{pred} – метка истинная и предсказанная;

A – алгоритм обучения;

m_k – число нейронов на k -м слое;

d_k – размерность X на входе ($k = 1, \dots, n$));

$X_{input} = T(X_1, X_2)$, где X_1, X_2 – вектор входных ситуаций;

T – способ формирования X_{in} .

Задача оптимизации состоит в том, чтобы подобрать управляемые параметры модели так, чтобы оптимизировать критерий качества нейросетевой модели. В качестве критерия качества выступают метрики качества. Для решения этой задачи могут быть использованы методы поисковой оптимизации с эвристическим перебором значений управляемых параметров.

В пункте 3.2 сформулирована задача преобразования решений из базы знаний для их использования в новой ситуации. Эта задача возникает в случае отсутствия в БП готовых решений или готовых подпоследовательностей, удовлетворяющих условию применимости $Sim(Sit_{act}, Sit_z) > Th$. Она базируется на гипотезе о том, что при наличии некоторого решения (последовательности мультивекторов) им можно воспользоваться, если ситуацию предварительными преобразованиями привести к тому виду, который будет отвечать критерию применимости $Sim(Sit_{act}, Sit_z) > Th$, и эти преобразования могут быть найдены из других программ действий, имеющихся в БП.

Предполагается, что в БП последовательности преобразований более короткие, чем необходимые для разрешения данной ситуации. Элементарные преобразования формируют последовательность элементарных преобразований для i элемента

$$A^i: (S_{zi}^s, \dots, S_{zi}^{s \text{ end}}),$$

таких, что $Sim(S_{act i}, S_{zi}^s) \geq Th$, т.е. эти вектора состояний обладают необходимой степенью схожести друг с другом, где s – некоторый номер в той или иной (z, i)-й последовательности состояний, соответствующей i -му элементу в z -й ситуации.

Тогда можно собрать последовательность R^a преобразований A^i , в которой поэлементно за N шагов производится перевод исходной ситуации и, соответственно, вектора S_{act} в желаемый S_z^k .

$$R^a = (A^{i0}, A^{i1}, \dots, A^{i\text{end}}).$$

В четвертой главе представлено описание программного комплекса – Платформы для быстрой сборки интеллектуальных систем поддержки принятия решений, его алгоритмы, описание базового набора модулей. Приведены тестовые испытания программного комплекса.

Оригинальность программного решения определяется тем, что логическая и физическая архитектура Платформы реализует концепцию гибридного CBR и идею быстрого создания системы поддержки принятия решений.

Логическая архитектура Платформы разработана на основе схемы гибридного ситуационного вывода и предусматривает набор модулей и их взаимосвязь, которые обеспечивают следующие функции:

- обеспечение создания предметно-ориентированной интеллектуальной системы вывода решений на прецедентах в ситуациях, возникающих на сложных технологических объектах;
- сборка функциональных модулей в готовую систему вывода решений;
- заполнение и ведение базы правил логического вывода;
- ведение базы прецедентов в виде пар «Ситуация-Решение»;
- классификация состояний элементов сложного объекта по входным данным;
- вывод решения по входным данным о ситуации.

На рисунке 1 показана логическая архитектура Платформы. На вход от элементов поступают данные различного типа. На их основе производится классификация состояний элементов с помощью классификаторов. Классификаторы выдают вектора S_i , характеризующие состояния элементов. На основе конкатенации векторов производится распознавание особой (нежелательной, опасной) ситуации. Если такая ситуация идентифицирована, то результат конкатенации векторов применяется для отбора схожей ситуации из базы знаний. Отобранная ситуация, выступает ключом для извлечения из базы состава решения и его вывода пользователям.

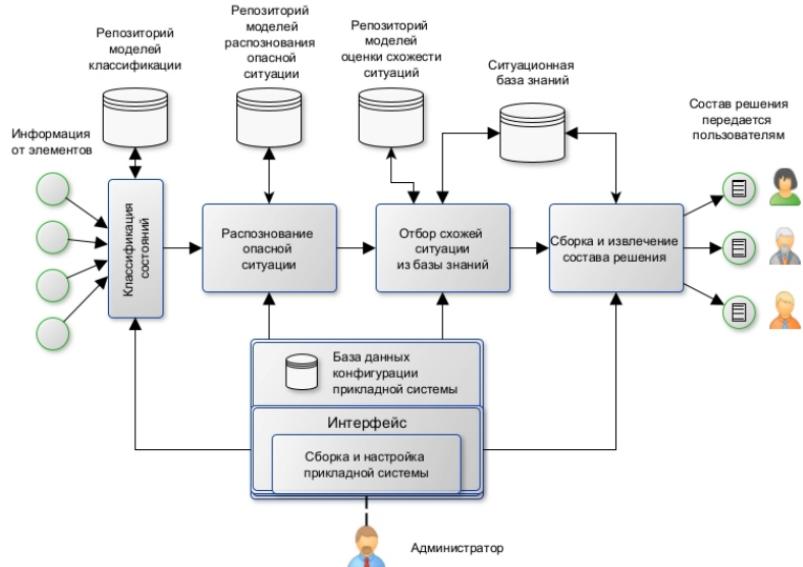


Рис. 1. Логическая архитектура Платформы

Создание предметно-ориентированной интеллектуальной системы с помощью средств Платформы реализуется через интерфейс администратором.

Дальнейшее функционирование системы ведется в режиме реального времени. Отмеченные пользователи – предопределенные адресаты для получения решения.

Модуль настройки (сборки) платформы реализован с помощью средств библиотеки Python Flask. Библиотека обеспечивает реализацию Платформы в виде web-приложения с интерфейсом, что позволяет создавать масштабируемую фреймворк-платформу, понятную для конечного пользователя, не имеющего опыта взаимодействия с кодом и нейросетевыми моделями.

В п 4.6. представлен алгоритм генерации ситуаций. Данный алгоритм может использоваться на этапе наполнения базы знаний, когда вместе с алгоритмом адаптации решений формируются новые прецеденты.

В п 4.7 приведен пример тестового набора прецедентов для ситуационной базы знаний и состав решения.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы, намечены направления перспективных исследований.

В приложении 1 представлено руководство пользователя Платформы для быстрого создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений «ГИБС СИСТЕМ».

В приложении 2 представлена архитектура модуля «оркестратор» Платформы для быстрого создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений «ГИБС СИСТЕМ».

В приложении 3 представлены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В приложении 4 представлен акт внедрения результатов исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации решена актуальная задача исследования и разработки математического, алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальных систем поддержки принятия решений на сложных технологических объектах (СТО). Решение этой задачи имеет научную и практическую ценность для построения ИСПРП при эксплуатации СТО, для которых значимы оценка комплексной ситуации на объекте с учетом контекста и быстрое предоставление пользователю предлагаемых к исполнению в случае нежелательной ситуации действий.

Предложена новая концепция моделирования сложного технологического объекта, где внешние условия (контекст) рассматриваются как часть этого объекта. На ее основе разработаны новые методы математического моделирования для представления сложного технологического объекта, ситуаций на объекте и решений, сопоставленных с проблемными, нежелательными ситуациями. Такой подход к моделированию позволяет единообразно представить различную информацию, поступающую от компонентов, для моделирования комплексной ситуации на объекте с учетом контекста.

Для выдачи решений предложен метод моделирования процесса выработки решения на базе гибридного метода рассуждения на основе прецедентов. Метод позволяет устранить ограничения раздельного применения этих подходов: системы, основанные на знаниях,

требуют трудоемкой работы по выявлению и формализации знаний; методы машинного обучения требуют большие объемы обучающих примеров.

Для поиска схожих прецедентов и дальнейшей выдачи их решения введена обучаемая функция выбора решения на основе определения схожести ситуаций. Функция строится на основе нейросетевой модели, архитектура которой определяется в ходе подбора гиперпараметров на этапе обучения. Эта функция, в отличие от традиционных метрик близости, позволяет учитывать особенности функционирования конкретного СТО, так как соответствующие знания используются при обучении модели, что определяет гибкость предложенного подхода к нахождению схожих ситуаций СТО.

Разработан алгоритм сборки и адаптации решения на основе имеющихся прецедентов в базе знаний. Этот алгоритм позволяет в случае отсутствия в базе знаний подходящего решения на основе имеющихся прецедентов синтезировать новое решение путем сборки решения из имеющихся в базе элементных преобразований состояний компонентов объекта и последовательностей таких преобразований. Разработан алгоритм генерации обучающих множеств, опирающийся на предложенный метод моделирования состояний сложных технологических объектов. Совместная работа алгоритмов позволяет пополнять базу знаний новыми прецедентами на основе ранее валидированных знаний (решений и данных) об объекте.

На основе разработанных методов и алгоритмов разработан комплекс программ – Платформа для быстрой сборки интеллектуальных систем поддержки принятия решений, позволяющая собирать и настраивать из готовых модулей предметно-ориентированную ИСППР. Платформа представляет собой инструмент для создания ИСППР, предназначенных для конкретных СТО различных областей, что определяет универсальность предложенных решений.

В процессе исследования проведена апробация предложенных методов, алгоритмов и программного комплекса на примерах сложных технологических объектах: тепловой пункт здания, электроподстанция и умная ферма, где в качестве получаемых данных выступала, в том числе, текстовая информация от персонала в неструктурированном виде. Результаты апробации показали применимость

и эффективность предложенных методов для вывода состава решения в случае сложного технологического объекта, состояние которого описывается мультимодальными данными. Результаты использованы при разработке системы поддержки принятия решений на объектах агрокомплекса, что подтверждается актом о внедрении (Приложение 4 диссертации).

Ограничения разработанных методов и алгоритмов для интеллектуальных систем поддержки принятия решений сводятся к ограничениям ситуационного метода (CBR): отсутствие ситуации (отсутствие информации для принятия решения). Другое ограничение заключается в невозможности формализовать информацию для получения описания комплексной ситуации, в том числе, вследствие ее неточности, абстрактности, субъективности. Также нецелесообразно применение в случае отсутствия достаточного объема знаний (пар ситуация-решение) и невозможности накопления этих знаний в ходе эксплуатации (расширения базы знаний).

Результаты диссертационного исследования были использованы в следующих проектах:

- «Разработка платформы для быстрого создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений в процессах эксплуатации и управления сложными технологическими объектами». Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Номер: 30ГС1ИИС12-Д7/71346 от 13.12.2021 (Руководитель).
- «Гибридные модели прецедентного вывода решений в интеллектуальных системах мониторинга технологических объектов городской инфраструктуры». РФФИ и Тюменская область № 20-47-720004, 2020-2022 (Исполнитель).
- «Интеллектуальная система биологической защиты растений в модульных агробиотехкомплексах». Проект в рамках деятельности Западно-Сибирского межрегионального НОЦ мирового уровня. 2023-2024 (Исполнитель).

Перспективы дальнейшей разработки темы. Перспективы связаны с внедрением языковых моделей с технологиями RAG (Retrieval Augmented Generation), что позволит снизить трудозатраты на наполнение базы знаний, настройку функции вычисления схожести ситуаций, а также снимет часть ограничений применимости.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ

1. Глухих, И.Н., Глухих, Д.И. Алгоритмы генерации обучающих множеств в системе с прецедентным выводом на основе ситуаций-примеров [Текст] // Программные продукты и системы (Software&Systems). — 2022. — № 4. — С. 660–669. DOI: 10.15827/0236-235X.140.660-669.
2. Глухих, И.Н., Глухих, Д.И. Адаптация решений системы с выводом на прецедентах при возникновении новых ситуаций [Текст] // Южно-сибирский научный вестник. — 2022. — № 2 (42). — С. 132–136.
3. Глухих, Д.И., Глухих, И.Н. Интерактивная модель авторасчета комплексной стоимости строительства кустовой площадки скважин // Вестник Евразийской науки. — 2021. — № 4 (13). DOI: 10.15862/06SAVN421. — URL: <https://esj.today/06savn421.html>.
4. Глухих, Д.И., Глухих, И.Н. Метод Case Based Reasoning при управлении сложными технологическими объектами городской инфраструктуры // Инженерный вестник Дона. — 2021. — № 7. — URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7074>.
5. Глухих, И.Н., Глухих, Д.И., Карякин, Ю.Е. Представление и отбор ситуаций на сложном технологическом объекте в условиях неопределенности // Вестник Российского нового университета. Сер. Сложные системы: модели, анализ и управление. — 2021. — № 2. — С. 65–73. DOI: 10.25586/RNU.V9187.21.02.P.065.
6. Глухих, И.Н., Глухих, Д.И., Карякин, Ю.Е. Нейросетевая архитектура вывода решений в опасных ситуациях на сложном технологическом объекте // Прикладная информатика. — 2021. — № 5. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-5-99-107.
7. Глухих, И.Н., Прохоршин, А.С., Глухих, Д.И., Филатова, Т.А. Нейросети компьютерного зрения в системах поддержки принятия решений на умной ферме // Вестник российской сельскохозяйственной науки. — 2024. — № 1. — С. 53–57. — URL: <https://www.vestnik-rsn.ru/vrsn/article/view/1186>.
8. Глухих, Д.И. Методы компьютерного зрения для предсказательной оценки объемов урожая продукции на городской ферме / И.Н. Глухих, А.С. Прохоршин, В.Н. Щербакова, А.Е. Мальцева, Д.И. Глухих // Вестник Евразийской науки. — 2023. — Т. 15, № 5. EDN LTBMUN.

В научных журналах, индексируемых в Scopus, WoS

9. Glukhikh, I., Glukhikh, D. Case-Based Reasoning with an Artificial Neural Network for Decision Support in Situations at Complex Technological

Objects of Urban Infrastructure // Applied System Innovation. — 2021. — Т. 4, № 4. — С. 73. DOI: 10.3390/asi4040073.

10. Glukhikh, D., Shchinnikov, I., Glukhikh, I. Using hybrid-CBR for intelligence monitoring and decision-making systems on SMART grid // Intelligent Decision Technologies. — 2022. — Т. 16, № 2. DOI: 10.3233/IDT-210239.

11. Glukhikh, I., Chernysheva, T., Glukhikh, D. Neural Network Models for Situation Similarity Assessment in hybrid-CBR // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. — 2023. — С. 1–14. DOI: 10.3233/JIFS-221335.

12. Глухих, И. Н., Прохорин, А. С., Глухих, Д. И. Сравнение и отбор ситуаций в системах вывода решений на precedентах для "умной" фермы // Информатика и автоматизация. — 2023. — Т. 22, № 4. — С. 853–879. DOI: 10.15622/ia.22.4.6.

Публикации в материалах конференций, индексируемых в Web of Science, Scopus

13. Glukhikh, D. Glukhikh, Case Based Reasoning for managing urban infrastructure complex technological objects, CEUR Workshop Proceedings, 2843 (2021), 038. <https://ceur-ws.org/Vol-2843/paper038.pdf>

14. I. Glukhikh, D. Glukhikh, Situations representation and retrieve in the case-based reasoning system for managing a complex technological object, CEUR Workshop Proceedings, 2922 (2021), 017. <https://ceur-ws.org/Vol-2922/paper017.pdf>

15. Glukhikh, D.I., Glukhikh, I.N. (2024). Representation and Retrieving Situation Method in Situational Knowledge Base of CBR-System Based on Neural Network and Contrastive Learning. In: Kovalev, S., Kotenko, I., Sukhanov, A., Li, Y., Li, Y. (eds) Proceedings of the Eighth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’24), Volume 1. IITI 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1209. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-77688-5_27

Публикации в материалах конференций, индексируемых в РИНЦ

16. Глухих И.Н., Глухих Д.И. Архитектура системы поддержки принятия решений на сложном технологическом объекте на основе гибридного CBR // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: материалы IX Международной научно-практической конференции-конкурса / отв. ред. О.Н. Кузяков, О.В. Баюк. – Тюмень, 2022. – С. 99–102.

17. Глухих Д.И., Глухих И.Н. Классификация состояния объекта мониторинга с помощью нейросети // Математическое и информационное моделирование: материалы Всероссийской конференции молодых ученых.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. – Тюмень, 2022. – С. 132–137.

18. Глухих, Д.И. Исследование нейросетевой модели для оценки схожести ситуаций в системе поддержки принятия решений на основе метода CBR / Д.И. Глухих // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: материалы XI Международной научно-практической конференции-конкурса, Тюмень, 18–19 апреля 2024 г. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. – С. 42–46. – EDN НРHQGR.

Информация об авторстве открытий и изобретений, обладании патентами, свидетельствами

19. Модуль идентификации состояния объекта мониторинга на основе экспертных правил. Глухих Д.И. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022614358, 21.03.2022. Заявка № 2022613116 от 01.03.2022.

20. Платформа для быстрого создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений "ГИБС-СИСТЕМ". Глухих Дмитрий Игоревич, Глухих Игорь Николаевич Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022680042, 26.10.2022. Заявка № 2022669294 от 19.10.2022.

21. Программный модуль системы поддержки принятия решений на объектах фитосанитарного мониторинга. Глухих И.Н., Глухих Д.И., Хисамутдинова Г., Прохоршин А.С. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ Номер свидетельства: RU 2024612231. 27.12.2024

Подписано в печать 18.04.2025. Тираж 100 экз.
Объем 1,0 уч.-изд. л. Формат 60×84/16. Заказ 79.