ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.118.01, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ ИМ. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 27.10.2026 № 20

О присуждении Цыбикову Алексею Ринчиновичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «**Методический подход к построению цифровых двойников энергетических объектов с применением моделей машинного обучения (на примере солнечной электростанции)**» по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) принята к защите 21 июля 2026 года (протокол заседания № 17) диссертационным советом 24.1.118.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, совет создан приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 78/нк от 26.01.2023.

Соискатель **Цыбиков Алексей Ринчинович**, 6 января 1999 года рождения. В 2020 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по направлению подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» (бакалавриат). В 2022 году с отличием окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по направлению подготовки 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» (магистратура). В 2025 году освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Справка о сдаче кандидатских экзаменов № 25-04

выдана 3 июля 2025 года Институтом систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

В настоящее время Цыбиков Алексей Ринчинович работает в должности младшего научного сотрудника отдела систем искусственного интеллекта в энергетике Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в отделе систем искусственного интеллекта в энергетике Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Массель Людмила Васильевна, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, отдел систем искусственного интеллекта в энергетике, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Вохминцев Александр Владиславович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет», научно-исследовательская лаборатория «Интеллектуальные информационные технологии и системы», заведующий научно-исследовательской лабораторией;

Исаев Сергей Владиславович, кандидат технических наук, доцент, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», заместитель директора по научной работе

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск). В **положительном отзыве**, подготовленном и принятом на заседании научно-технического совета Инженерной школы информационных технологий и робототехники (протокол № 4 от 10 сентября 2026 года), подписанном

Кочегуровым Александром Ивановичем, кандидатом технических наук, доцентом отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники, председателем научно-технического совета Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Небабой Степаном Геннадьевичем, кандидатом технических наук, доцентом отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники, секретарем научно-технического совета Инженерной школы информационных технологий и робототехники, и утвержденном проректором по науке и стратегическим проектам Гоголевым Алексеем Сергеевичем, кандидатом физико-математических наук, указано, что диссертация Цыбикова А.Р. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена важная научно-практическая задача разработки комплексного подхода к построению и реализации цифрового двойника солнечной электростанции, обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью, соответствует критериям пунктов 9–14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (с изм. и доп.), а ее автор, Цыбиков Алексей Ринчинович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Соискатель имеет 17 работ по теме диссертации, в том числе 11 научных публикаций (4 статьи в рецензируемых научных изданиях рекомендованых ВАК РФ по специальности 1.2.2 (технические науки), 4 публикации, индексируемые в Scopus и/или Web of Science, 3 работы в других изданиях) и 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.

Вклад соискателя в подготовку статей в соавторстве оценивается как существенный. Основные результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены соискателем лично; типовая методика и типовая архитектура цифровых двойников возобновляемых источников энергии разработаны при его участии в неделимом соавторстве. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации. Заимствования, не отмеченные ссылками, отсутствуют. Из совместных работ в диссертацию включены лишь те результаты, которые непосредственно принадлежат соискателю.

Перечень основных научных работ:

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 1.2.2 (технические науки):

1. **Цыбиков, А.Р.** Разработка цифрового двойника ветровой электростанции: постановка задачи и проектирование / Л.В Массель, А.Г Массель, Н.И. Щукин, **А.Р. Цыбиков** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 1 (25). – С. 79-90.

2. **Цыбиков, А.Р.** Оценка устойчивости энергетических систем с применением методов машинного обучения / Л.В. Массель, А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов, Д.А. Гаськова, **А.Р. Цыбиков**, Н.И. Щукин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 248-261.

3. **Цыбиков, А.Р.** Построение цифровых двойников ветровой и солнечной электростанций на основе онтологического подхода / Л.В. Массель, А.Г. Массель, **А.Р. Цыбиков**, Н.И. Щукин, А.С. Лосев // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 7. – С. 28-32.

4. **Цыбиков, А.Р.** Методы построения умных цифровых двойников для проектирования возобновляемых источников энергии / Л.В. Массель, Н.И. Щукин, **А.Р. Цыбиков** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2026. – № 1(41). – С. 43-58.

Публикации, индексируемые в Scopus и/или Web of Science:

1. **Tsybikov, A.R. (Цыбиков А.Р.)** Agent-Service Approach to Building Digital Twins / L.V. Massel, A.G. Massel, **A.R. Tsybikov (А.Р. Цыбиков)** // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – 2024. – P. 411–415.

2. **Tsybikov, A. (Цыбиков А.)** Designing a Digital Twin of a Wind Farm / L. Massel, A. Massel, N. Shchukin, **A. Tsybikov (А. Цыбиков)** // Engineering Proceedings. – 2023. – Vol. 33.

3. **Cybikov, A. (Цыбиков А.)** Digital twin development of a solar power plant / L. Massel, N. Shchukin, **A. Cybikov (А. Цыбиков)** // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 289.

4. **Tsybikov, A.R. (Цыбиков А.Р.)** Technique for Building Digital Twins of Renewable Energy Sources / L.V. Massel, A.G. Massel, **A.R. Tsybikov (А.Р. Цыбиков)**// 2026 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – 2026. – P. 286–291.

На автореферат и диссертацию поступили 8 отзывов (все отзывы положительные, с замечаниями)

1. Отзыв **Зориной Татьяны Геннадьевны**, доктора экономических наук, профессора, заведующей лабораторией «Устойчивое энергетическое развитие» Института энергетики Национальной академии наук Беларуси. Содержит два замечания: 1) В работе рассматривается прогнозирование солнечной радиации как один из ключевых факторов генерации солнечной

электростанции (СЭС). Однако не уточнено, как метод EnvSwitch адаптируется для прогнозирования непосредственно выходной мощности СЭС, которая зависит не только от радиации, но и от температуры, скорости ветра и состояния оборудования. 2) Автор отмечает, что метод EnvSwitch показал снижение точности на сокращенном наборе данных (20 000 значений) по сравнению с XGBoost. Хотелось бы увидеть более детальный анализ причин этого явления и возможные пути повышения робастности метода при ограниченных выборках.

2. Отзыв **Дорогова Александра Юрьевича**, доктора технических наук, доцента, ведущего специалиста по информационным технологиям ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Содержит два замечания: 1) В методе EnvSwitch выбор модели прогнозирования зависит от текущего состояния внешней среды. Возникает вопрос, насколько результат работы метода чувствителен к положению границ между такими состояниями и требуется ли их дополнительная корректировка при переносе подхода на данные другого объекта или другого климатического периода. 2) Динамическое изменение состояния внешней среды может приводить к переключению между различными моделями машинного обучения. Представляется полезным уточнить, может ли такое переключение вызывать скачкообразное изменение прогнозируемой величины и предусматривается ли в программной реализации механизм сглаживания или согласования прогнозов в переходных режимах.

3. Отзыв **Евдокимовой Инги Сергеевны**, кандидата технических наук, доцента, заведующей кафедрой «Программная инженерия и искусственный интеллект» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления». Содержит два замечания: 1) Виртуальная среда используется для эмуляции данных на этапе научного прототипирования цифрового двойника. В этой связи следует уточнить, в каких задачах автор считает допустимым использовать эмулированные данные непосредственно для обучения моделей машинного обучения, а в каких – преимущественно для их предварительной настройки и тестирования? 2) При последующем накоплении реальных измерений закономерно изменяется соотношение между натурными и эмулированными данными. Было бы полезно пояснить, по каким признакам можно определить достаточность объема реальных данных для сокращения или прекращения использования эмулированных выборок при настройке интеллектуальных компонентов цифрового двойника.

4. Отзыв **Моисеевой Светланы Петровны**, доктора физико-математических наук, профессора, заведующей кафедрой теории вероятностей и математической статистики федерального государственного

автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет». Содержит два замечания: 1) В работе используется агрегированная математическая модель солнечной электростанции, ориентированная на включение в вычислительное ядро цифрового двойника. Следовало бы уточнить, какие процессы и особенности функционирования оборудования сознательно не учитываются при принятом уровне агрегирования и для какого класса расчетных задач такая степень детализации является достаточной. 2) Программный комплекс допускает изменение состава и параметров оборудования солнечной электростанции. Возникает вопрос, требуется ли при существенном изменении конфигурации объекта повторная параметризация математической модели и в какой мере такая перенастройка затрагивает используемые модели машинного обучения.

5. Отзыв **Подвесовского Александра Георгиевича**, кандидата технических наук, доцента, профессора кафедры «Информатика и программное обеспечение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет». Содержит три замечания: 1) В вычислительных экспериментах рассматриваются модели машинного обучения LSTM, GRU и XGBoost. Было бы целесообразно пояснить, чем был обусловлен выбор именно этих моделей для сравнительной оценки и использования в методе EnvSwitch. 2) В работе объединяются математическая модель солнечной электростанции и модели машинного обучения, формирующие прогнозные характеристики. Однако, остается не вполне понятным, на каком этапе работы цифрового двойника предполагается контролировать физическую допустимость прогнозируемых значений, например неотрицательность солнечной радиации и соответствие расчетной мощности техническим ограничениям станции. 3) При эксплуатации цифрового двойника данные измерительного оборудования могут содержать пропуски и ошибочные значения. Каким образом предполагается выявлять такие данные и предотвращать их влияние на определение состояния внешней среды и выбор прогнозной модели?

6. Отзыв **Загорулько Юрия Алексеевича**, кандидата технических наук, заведующего лабораторией искусственного интеллекта Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем информатики им. А.П. Ершова Сибирского отделения Российской академии наук. Содержит два замечания: 1) Для определения состояния внешней среды в работе предусматривается использование как онтологических экспертных правил, так и методов кластеризации. Было бы полезно уточнить, какими критериями следует руководствоваться при выборе одного из этих способов

для конкретной практической реализации цифрового двойника. 2) Онтологическая модель используется не только для описания предметной области, но и для поддержки выбора модели прогнозирования. В связи с этим возникает вопрос, каким образом предполагается корректировать правила и пороговые значения состояний внешней среды по мере накопления новых эксплуатационных данных.

7. Отзыв **Ковалева Сергея Протасовича**, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Содержит два замечания: 1) В разработанном подходе цифровой двойник объединяет математические и семантические модели, базу знаний, модели машинного обучения и виртуальную среду. Следует уточнить, какие из перечисленных компонентов являются обязательными для реализации предложенного подхода, а какие могут включаться в состав цифрового двойника в зависимости от конкретной решаемой задачи. 2) Автор рассматривает применение цифрового двойника как на стадии проектирования, так и при последующей эксплуатации энергетического объекта. Было бы полезно уточнить, какие компоненты разработанного прототипа или связи между ними требуют изменения при переходе от проектных расчетов к работе с реальной эксплуатационной телеметрией.

8. Отзыв **Иваньо Ярослава Михайловича**, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры информатики и математического моделирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского». Содержит два замечания: 1) Недостаточно четкую формулировку цели исследования, которая не обобщает хорошо сформулированные задачи; 2) В табл. 1 не раскрыто содержание метрик RMSE, MAE, MAPE и R^2, а констатированы только их преимущества и недостатки.

Замечания не снижают научной ценности и практической значимости диссертационной работы. На замечания оппонентов и ведущей организации, а также на замечания в отзывах, поступивших на автореферат и диссертацию, соискатель привел исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов обосновывается сферой их научных интересов и профессиональной деятельности в области математического моделирования, численных методов, интеллектуальных информационных технологий и разработки программных комплексов, их способностью определить научную и практическую ценность диссертационной работы, что подтверждается наличием публикаций оппонентов по теме диссертации в

рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, а также изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» проводились научные исследования в области математического моделирования, интеллектуальных информационных технологий, методов машинного обучения и разработки программных комплексов, соответствующих тематике диссертации. Это подтверждается наличием публикаций сотрудников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, и изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования, и их способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Основные научные результаты диссертационного исследования

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **разработан** методический подход к построению умного цифрового двойника солнечной электростанции, объединяющий математическое и семантическое моделирование с компонентами машинного обучения и методикой формирования виртуальной среды;

– **предложены** агрегированная математическая модель солнечной электростанции и формализованная модель умного цифрового двойника, являющаяся развитием и модификацией базовой модели цифрового двойника посредством включения компонентов искусственного интеллекта, базы знаний и виртуальной среды;

– **доказана** результативность применения адаптированного численного метода ансамблирования моделей машинного обучения с динамическим выбором на основе состояния внешней среды (EnvSwitch) для повышения точности прогнозирования солнечной радиации на полном наборе данных;

– **введена** система формализованного представления состояний внешней среды в виде режимов, определяемых с использованием онтологических моделей и методов кластеризации, предназначенная для динамического выбора прогнозной модели в составе метода EnvSwitch.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– **доказано**, что использование динамического выбора моделей машинного обучения с учетом состояния внешней среды позволяет повысить точность прогнозирования солнечной радиации;

– **применительно к проблематике диссертации результативно использована** совокупность методов математического и семантического

моделирования, инженерии знаний и машинного обучения при разработке формализованной модели умного цифрового двойника солнечной электростанции;

– **изложен** методический подход к построению умного цифрового двойника энергетического объекта, предусматривающий интеграцию математической модели объекта, цифровой тени, базы знаний, виртуальной среды и интеллектуальных компонентов в единую информационно-вычислительную систему (умный цифровой двойник);

– **раскрыты** особенности совместного применения математических моделей и методов машинного обучения при построении умного цифрового двойника энергетического объекта, а также организации взаимодействия их компонентов на основе агентно-сервисной архитектуры;

– **изучены** зависимости качества прогнозирования характеристик внешней среды от объема обучающих данных и выбора модели машинного обучения, выявлены особенности применения методов LSTM, GRU, XGBoost и EnvSwitch при различных объемах выборок;

– **проведена модернизация** процедуры ансамблирования моделей машинного обучения с динамическим выбором посредством учета состояния внешней среды, формализованного с использованием онтологического описания и выделения режимов функционирования.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что**:**

– **разработаны и внедрены** в научный прототип умного цифрового двойника солнечной электростанции программные компоненты математического моделирования и прогнозирования с использованием машинного обучения, обеспечивающие выполнение вычислительных экспериментов;

– **определены области** практического применения предложенного методического подхода, агрегированной математической модели СЭС и метода EnvSwitch для проектирования цифровых двойников, расчета характеристик солнечных электростанций, прогнозирования и проведения вычислительных экспериментов;

– **создана** программная реализация научного прототипа умного цифрового двойника солнечной электростанции с агентно-сервисной архитектурой, объединяющая вычислительное ядро, цифровую тень, базу данных, виртуальную среду и интеллектуальные компоненты;

– **представлены** результаты вычислительных экспериментов, демонстрирующие возможности и ограничения применения метода EnvSwitch при различных объемах обучающих данных.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

– **для экспериментальных работ** использованы реальные и эмулированные данные о характеристиках внешней среды, проведены вычислительные эксперименты на наборах данных различного объема с оценкой результатов на обучающих и тестовых выборках;

– **теория,** в виде предложенного методического подхода, основана на известных математических зависимостях, описывающих функционирование солнечных электростанций, а также на современных методах математического моделирования, машинного обучения и инженерии знаний;

– **идея базируется** на анализе существующих подходов к построению цифровых двойников энергетических объектов и необходимости интеграции математических моделей, интеллектуальных методов анализа данных и виртуальной среды в единую информационно-вычислительную систему (умный цифровой двойник);

– **использованы** результаты сравнительных вычислительных экспериментов с моделями LSTM, GRU, XGBoost и методом EnvSwitch для оценки точности прогнозирования по общепринятым метрикам RMSE, MAE и R^2;

– **установлено,** что точность прогнозирования зависит от объема используемых данных и выбора модели машинного обучения, что подтверждается результатами сравнительных вычислительных экспериментов;

– **использованы** современные методы обработки и анализа данных, оптимизации гиперпараметров моделей машинного обучения, а также программные средства проведения вычислительных экспериментов и сравнительной оценки результатов прогнозирования.

Личный вклад соискателя состоит**:**

в анализе существующих математических моделей, методов машинного обучения и подходов к построению цифровых двойников энергетических объектов, в формулировании и решении задач диссертационного исследования;

в разработке методического подхода к построению умного цифрового двойника СЭС, агрегированной математической модели СЭС, формализованной модели умного цифрового двойника, адаптации метода ансамблирования с динамическим выбором EnvSwitch и разработке методики построения виртуальной среды;

в проектировании агентно-сервисной архитектуры, разработке программных компонентов научного прототипа умного цифрового двойника СЭС, подготовке и анализе наборов данных, проведении и интерпретации вычислительных экспериментов;

в представлении результатов на научных мероприятиях, подготовке публикаций, оформлении результатов создания программных компонентов.

При этом типовая методика построения цифровых двойников возобновляемых источников энергии (ЦД ВИЭ) и типовая архитектура ЦД ВИЭ (как основа предложенных автором конкретных методик построения и архитектуры умного ЦД СЭС) разрабатывались с участием соискателя в неделимом соавторстве.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. В обосновании актуальности следовало обратить большее внимание на проблемы проектирования солнечных электростанций.
2. Для усиления практической значимости результатов работы было бы желательно рассмотреть вопросы взаимодействия с проектировщиками СЭС.
3. Учитывает ли цифровая модель угол поворота солнечной панели и включены ли в модель другие компоненты СЭС, кроме солнечных панелей?

Соискатель Цыбиков Алексей Ринчинович ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Предлагаемый подход может быть применен не только для солнечных электростанций, поэтому акцент был сделан на актуальности проблемы создания умных цифровых двойников энергетических объектов.
2. К сожалению, учитывая отсутствие в РФ нормативных документов, регулирующих применение цифровых двойников в энергетике, на этом этапе контакты с конкретными специалистами и реальными объектами затруднены.
3. Да, угол поворота солнечной панели учитывается. В модель включены другие компоненты, их можно добавлять, например, в интерфейсе показаны сетевой инвертор и возможность выбора аккумулятора

На заседании 27 октября 2026 года диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи разработки комплексного подхода к построению умных цифровых двойников энергетических объектов на примере солнечной электростанции, объединяющего математическое и семантическое моделирование, методы машинного обучения и методику построения умных цифровых двойников, имеющей значение для развития математического моделирования и вычислительных технологий в энергетике, присудить Цыбикову Алексею Ринчиновичу ученую степень кандидата технических наук

по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – 0 человек, проголосовали: за – 16, против – нет, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель
диссертационного совета Стенников Валерий Алексеевич

Ученый секретарь
диссертационного совета Солодуша Светлана Витальевна

27 октября 2026