

На правах рукописи



Кузьмин Владимир Русланович

**МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ОБЪЕКТАМИ ЭНЕРГЕТИКИ**

Специальность: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ

Массель Людмила Васильевна

Официальные оппоненты: **Захарова Алёна Александровна**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, лаборатория № 80 «Киберфизические системы», главный научный сотрудник

Николайчук Ольга Анатольевна

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория 4.2. «Информационно-телекоммуникационные технологии исследования техногенной безопасности», ведущий научный сотрудник


Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск**

Защита состоится «28» декабря 2023 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета 44.2.002.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ауд. А-803; тел. 8(395-2)638-394, email: diss_sovet@irgups.ru

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», <https://www.irgups.ru>

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета д.т.н., доцент

 Л.В. Аршинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, одними из приоритетов государственной энергетической политики являются переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, а также рациональное природопользование и энергетическая эффективность.

В настоящее время экологические оценки деятельности объектов энергетики выполняются при помощи проведения замеров и постоянного мониторинга эмиссии загрязняющих веществ в элементы природной среды, с применением статистической информации, Государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды» и отчетных данных предприятий. В том случае, если достоверная информация отсутствует, то оценка загрязнения объектами энергетики может быть проведена по результатам вычислительного эксперимента с использованием существующих утвержденных методик.

Существующие методики, использующиеся для оценки загрязнения объектами энергетики, применяются по отдельности, что усложняет интегральную оценку загрязнения окружающей среды, автору не удалось найти сведений о попытках интеграции этих методик. Поскольку область исследований влияния объектов энергетики на загрязнение окружающей среды является междисциплинарной, требующей интеграции знаний в области энергетики, экологии, экономики, информационных технологий, очевидно, что необходим системный подход к решению поставленной задачи, требующий выполнения системного анализа в перечисленных областях и постановки задачи с его применением, и использования семантических технологий¹ для решения поставленной задачи. Таким образом, разработка, на основе системного анализа, методического подхода к оценке загрязнений окружающей среды объектами энергетики и принятию решений по снижению их вредного воздействия, а также программно-инструментальных средств его поддержки являются актуальными задачами. Онтологии в работе рассматриваются согласно Т.А. Гавриловой: формальное представление предметной области, которое включает словарь указателей на термины предметной области и логические выражения, которые описывают, что эти термины означают, как соотносятся друг с другом, и как они могут или не могут быть связаны между собой. Определение событийных моделей приведено согласно Л.Н. Столярову: это набор связанных между собой причинно-следственными связями событий, реализация которых отражает динамику поведения системы в ответ на возникновение иницирующего события.

Развитие методов системного анализа представлено в работах В.Н. Волковой, Н.И. Воропая, В. Кинга, Д. Клиланда, Новикова Д.А., Ф.И. Перегудова, М.П. Силич,

¹ Массель Л.В., Массель А.Г. Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования / Материалы III международной научно-технической конференции OSTIS-2013. – Беларусь, Минск: БГУИР, 2013. – С. 247-250.

Ф.П. Тарасенко, С. Оптнера, Ю.И. Черняка, и др. Проблемы экологических оценок деятельности предприятий рассматриваются национальными органами власти и международными организациями, такими как Программа ООН по окружающей среде (United Nations Environment Programme), Всемирная организация здравоохранения, Организация экономического сотрудничества и развития (Organisation for Economic Co-operation and Development) и др., а также в работах зарубежных и российских учёных: Draxler R.R., Pavlickova K., Hussey, K., Аргучинцевой А.В., Арсланбековой Ф.Ф., Берлянда М.Е., Гурмана В.И., Воробьева В.И., Кожанова А.А., Моложниковой Е.В., Осипова В.И., Таловской А.В., Язикова Е.Г. и др. Вопросы разработки информационных систем и визуализации рассматривались в работах: S.J. Russel, P. Norvig, Городецкого В.И., Тарасова В.Б., Гергет О.М., Еремченко Е.Н., Захаровой А.А., Берестневой О.Г., Иванова Р.А. и др., вопросы разработки и применения семантических моделей в работах: N. Guarino, Гавриловой Т.А., Хорошевского В.Ф., Столярова Л.Н., Аршинского В.Л., и др. В ИСЭМ СО РАН вопросы оценки загрязнения объектами энергетики окружающей среды рассматривались в работах Санеева Б.Г., Ивановой И.Ю., Майсюк Е.П., Зароднюка М.С., Ижбулдина А.К и др., исследования энергетических систем: Мелентьева Л.Н., Макарова А.А., Криворуцкого Л.Д., Воропая Н.И., Санеева Б.Г., Кононова Ю.Д. и др., вопросы применения интеллектуальных технологий в исследованиях энергетики: Массель Л.В., Масселя А.Г., Ворожцовой Т.Н., Макагоновой Н.Н., Томина Н.В., Гальперова В.И., Барахтенко Е.А., Соколова Д.В., Домышева А.В., Сидорова Д.Н. и др.

Цель работы: разработка методического подхода, алгоритмов и программ для оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики и поддержки принятия решений по снижению их вредного воздействия, основанных на использовании авторской информационно-вычислительной системы (ИВС).

Поставлены и решены следующие задачи:

1. Системный анализ энергетической инфраструктуры, существующих методов и моделей для оценки загрязнений окружающей среды объектами энергетики, интеллектуальных технологий и подходов к построению информационно-вычислительной системы (ИВС) с их использованием, результатом которого, в частности, является построение системы онтологий.
2. Разработка методического подхода к оценке загрязнения окружающей среды объектами энергетики, интегрирующего разрозненные методики с применением семантических технологий в рамках авторской ИВС, и включающего:
 - систему онтологий, интегрирующую онтологии объектов энергетики и онтологии влияния объектов энергетики на окружающую среду;
 - принципы интеграции методик расчётов выбросов и распространения загрязнений в атмосфере;
 - алгоритмы расчётов выбросов и распространения загрязнений и оригинальный алгоритм пост-обработки результатов расчётов распространения загрязнений;

- методику оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды объектами энергетики.
3. Разработка формализованной модели ИВС и методики проектирования ИВС на основе агентно-сервисного подхода с применением событийных моделей для описания агентных сценариев
 4. Разработка баз данных и баз знаний на основе системы онтологий, интегрирующей онтологии объектов энергетики и онтологии загрязнений окружающей среды объектами энергетики.
 5. Разработка базовых программных компонентов, реализующих предложенные алгоритмы расчётов выбросов и распространения загрязнений.
 6. Интеграция разработанных программных компонентов, баз данных и баз знаний в рамках ИВС для оценки загрязнений окружающей среды объектами энергетики
 7. Разработка технологии оценки загрязнений окружающей среды объектами энергетики и информационной поддержки выработки рекомендаций для принятия решений по снижению их вредного воздействия с использованием предложенного методического подхода и разработанных инструментальных средств.
 8. Проведение исследований на основе серии вычислительных экспериментов с применением предложенной технологии и разработанной ИВС.

Объектом исследования являются объекты энергетики, оказывающие вредное воздействие на окружающую среду, в первую очередь объекты теплоэнергетики.

Предмет исследования: методы оценки загрязнений окружающей среды объектами энергетики и методы построения ИВС для поддержки принятия решений по снижению вредного воздействия объектов энергетики на окружающую среду, основанные на представлении и обработке знаний, математическом и семантическом моделировании и визуальной аналитике.

Методы исследования: для решения поставленных задач использовались методические основы построения интеллектуальных информационных систем в исследованиях энергетики; методы математического и семантического моделирования; методы представления и обработки знаний; методы агентно-ориентированного проектирования, программирования и разработки многоагентных систем; методы проектирования и программирования клиент-серверных Web-приложений.

Составляют предмет **научной новизны** и выносятся **на защиту** следующие положения:

1. Впервые предложен методический подход к оценке загрязнения окружающей среды объектами энергетики, отличающийся интеграцией разрозненных методик и применением семантических технологий в рамках авторской ИВС, и включающий:

- систему онтологий, интегрирующую онтологии объектов энергетики и онтологии влияния объектов энергетики на окружающую среду и позволяющую структурировать знания предметной области;
 - принципы интеграции методик расчётов выбросов и распространения загрязнений, позволяющие выработать интегральный подход к оценке загрязнений;
 - алгоритмы расчётов выбросов и распространения загрязнений, позволяющие автоматизировать расчеты, и оригинальный алгоритм пост-обработки результатов расчётов распространения загрязнений, позволяющий построить поля концентрации загрязняющих веществ, накапливаемых в течение временного промежутка;
 - методику оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды объектами энергетики, позволяющую оценивать экономический ущерб в результате выбросов загрязняющих веществ.
2. Предложены формализованная модель ИВС и методика проектирования ИВС на основе агентно-сервисного подхода, отличающаяся применением событийных моделей для описания агентных сценариев, позволяющих автоматизировать взаимодействие агентов, и применением онтологий для проектирования баз данных, позволяющих обеспечить верификацию и корректность моделей данных.
 3. Разработана технология оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики, отличающаяся использованием предложенного методического подхода и разработанной ИВС, и позволяющая интегрировать существующие методики, получать количественные оценки загрязнений и их визуализацию, и качественные оценки для формирования рекомендаций.

Теоретическая значимость работы подтверждается применением результатов диссертационной работы в проектах, поддержанных грантами Евразийской ассоциации поддержки научных исследований (ЕАПИ) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): № 18-57-81001 ЕАПИ-РФФИ (2018-2019) «Методы и технологии оценки влияния энергетики на геоэкологию региона», РФФИ № 19-37-50070 мол_нр (2020) «Методы и модели построения интеллектуальной системы семиотического типа для поддержки принятия решений в энергетике и экологии» (в котором автор являлся единственным исполнителем), а также в проектах по грантам РФФИ № 15-07-01284 (2017), № 16-07-004574 (2017-2018), № 17-07-01341 (2017-2019), № 18-07-00714 (2018-2020), № 18-37-00271 мол_а (2018-2019), № 19-07-00351 (2019-2021), № 19-57-04003 Бел_мол_а (2019-2020), а также гранта Российского научного фонда № 22-21-00841.

Практическая значимость работы определяется программной реализацией ИВС WICS, реализацией баз данных выбросов вредных веществ от объектов энергетики и результатов снегосъёмки и реализацией базы знаний, интегрирующей систему онтологий. Выполнены исследования оценки загрязнений окружающей

среды объектами энергетики и оценки экономического ущерба от загрязнений на примере Центральной экологической зоны Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ) и г. Иркутска с применением предложенной технологии и разработанных программных средств. Предложенный методический подход и ИВС WICS могут быть применены для оценки загрязнений окружающей среды объектами энергетики при вводе новых мощностей, реорганизации существующих объектов, геофизическом мониторинге, проведении контрольно-надзорных мероприятий регулирующими органами власти.

Результаты работы применены при выполнении:

- проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН: III.17.2.1 «Проблемы разработки, адаптации и применения интеллектуальных информационно-телекоммуникационных технологий в интегрированных интеллектуальных энергетических системах», № госрегистрации АААА-А17-117030310444-2, тема (проект) № 0349-2016-0005 (2017-2020);
- проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН: «Методология построения ИТ-инфраструктуры для разработки интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики», № госрегистрации АААА-А21-121012090007-7, тема (проект) № FWEU-2021-0007 (2021-2022).

В рамках выполнения проекта №18-57-81001 ЕАПИ-РФФИ (2018-2019) результаты диссертационной работы были переданы в Институт энергетики НАН Беларуси. По результатам представления работы в 2019 году автору присуждена стипендия мэра г. Иркутска в области науки и техники.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика: п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации. (пп. 1, 3 новизны); п. 9. Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов. (п. 2 новизны); п. 10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах. (пп. 1, 2 новизны); п. 12. Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации (пп. 2, 3 новизны)

Личный вклад. Постановка задачи выполнена совместно с руководителем. Результаты, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором либо в неделимом соавторстве. Конфликт интересов с соавторами отсутствует. Автором был предложен методический подход к оценке загрязнений окружающей среды, разработана ИВС WICS для проведения исследований оценки загрязнения объектами энергетики окружающей среды, а также предложена технология оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики и поддержки принятия решений по снижению их вредного воздействия. Также лично автором были проведены исследования на примере ЦЭЗ БПТ и г. Иркутска.

Апробация работы: Результаты работы, а также результаты отдельных исследований и разработок автора докладывались на международных конференциях «Young Scientists Conference», 2019 г., Ираклион (Греция); «Computer Science and Information Technologies», Баден-Баден (Германия), 2017 г., Варна (Болгария), 2018 г., Вена (Австрия), 2019; международном конгрессе по интеллектуальным системам и информационным технологиям, п. Дивноморское (Россия), 2018 и 2021 г.; международной конференции «Computer Technology and Applications», Владивосток (Россия), 2017 г.; Международной конференции «Физико-техническая информатика – СРТ2020», 2020 г., Пущино (Россия); международных научных семинарах «Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing And Cyber Security», 2017 г. и «Critical Infrastructures in Digital World», 2018-2022 гг., Иркутск (Россия); XXII – XXVII Байкальских Всероссийских конференциях «Информационные и математические технологии в науке и управлении», г. Иркутск (Россия), 2017-2022 гг.; конференции молодых ученых ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск (Россия), 2017-2021 гг., а также на секциях Ученого Совета ИСЭМ СО РАН и семинарах Отдела систем искусственного интеллекта в энергетике ИСЭМ СО РАН.

Публикации: По теме исследования опубликованы 19 статей, из них 2 – в журнале из перечня ВАК по специальности, 2 – в журналах из перечня ВАК по прочим специальностям и отраслям, 3 – в рецензируемых научных журналах; 6 статей проиндексированы в Scopus и WOS. Получены 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.

Объем и структура работы: Диссертация объемом 175 стр. состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 150 наименований, 6 приложений, основной текст изложен на 112 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность рассматриваемой проблемы, сформулирована цель работы и определены задачи, необходимые для ее достижения. Сформулированы основные положения, составляющие новизну и выносимые на защиту. Приводится общая характеристика работы.

Первая глава посвящена системному анализу предметных областей: энергетике и оценке загрязнения окружающей среды объектами энергетики. Приведено описание системного анализа, его основных понятий, этапов и типов задач. Описаны существующие подходы, методики и инструментальные средства для оценки загрязнения, возможности их использования, преимущества и недостатки. В выводах по главе выполнена постановка задачи диссертационной работы, связанная с разработкой методического подхода и инструментальных средств оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики в условиях увеличения накопленного вреда окружающей среде и изменений международного нормативно-правового регулирования климатической и экологической политики.

Во второй главе представлен предлагаемый автором *методический подход* к оценке загрязнения окружающей среды объектами энергетики, отличающийся интеграцией разрозненных методик и применением семантических технологий в рамках авторской информационно-вычислительной системы (ИВС). Методический подход включает в себя:

- систему онтологий, интегрирующую онтологии объектов энергетики и онтологии влияния объектов энергетики на окружающую среду;
- принципы интеграции методик расчётов выбросов и распространения загрязнений;
- алгоритмы расчётов выбросов и распространения загрязнений и оригинальный алгоритм пост-обработки результатов расчёта распространения загрязнений;
- методику оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды объектами энергетики.

В результате проведённого онтологического инжиниринга разработана *система онтологий, интегрирующая онтологии объектов энергетики и онтологии влияния объектов энергетики на окружающую среду*, представленная на рис. 1.

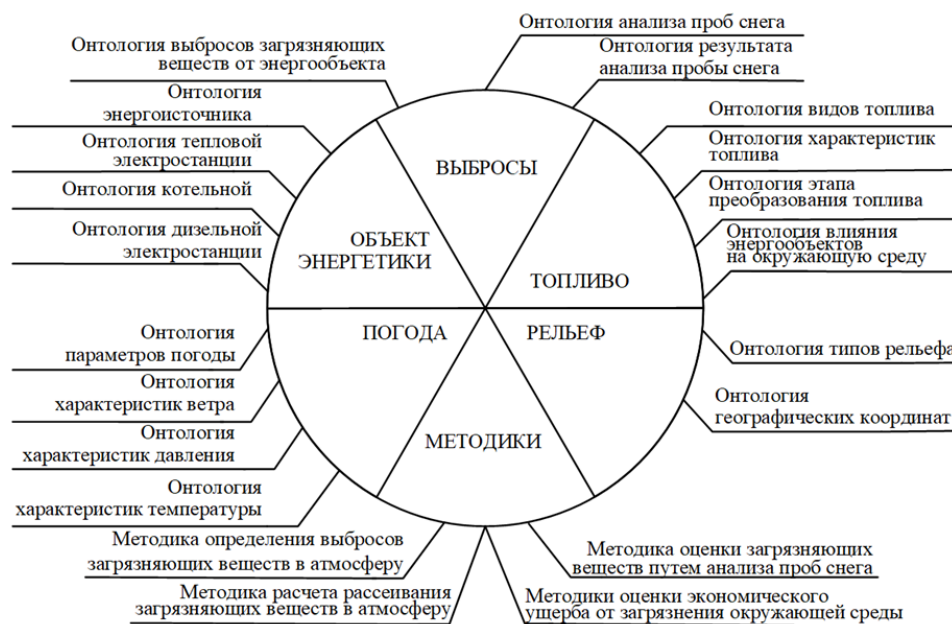


Рис. 1. Система онтологий, интегрирующая онтологии объектов энергетики и онтологии влияния объектов энергетики на окружающую среду

Эта система онтологий легла в основу структурирования знаний предметной области и построения моделей данных при проектировании баз данных, рассмотренных далее. Система онтологий (рис. 1), преобразованная в цифровой вид, является основой базы знаний ИВС.

На основе федерального закона (федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ), были разработаны *принципы интеграции методик расчётов выбросов и распространения загрязнений* и представлена схема интеграции методик оценки влияния объектов энергетики на окружающую среду в нотации IDEF0. Основные принципы интеграции:

1. Применимость интегрируемых методик к рассматриваемой территории.
2. Системность и комплексность подхода к оценке влияния объекта энергетики на окружающую среду.
3. Сопоставимость результатов расчетов по интегрируемым методикам в единицах измерения, типам выбросов.
4. Формулирование рекомендаций на качественном уровне, выработанных на основе вычислительного эксперимента.

Далее в работе приведены **алгоритмы расчётов выбросов и распространения загрязнений, позволяющие автоматизировать эти расчеты.** Поскольку используемые методики не включают методы построения полей концентрации ЗВ от источников выбросов в течение временного промежутка, автором предложен алгоритм пост-обработки результатов расчётов распространения загрязнений, приведённый на рисунке 2.

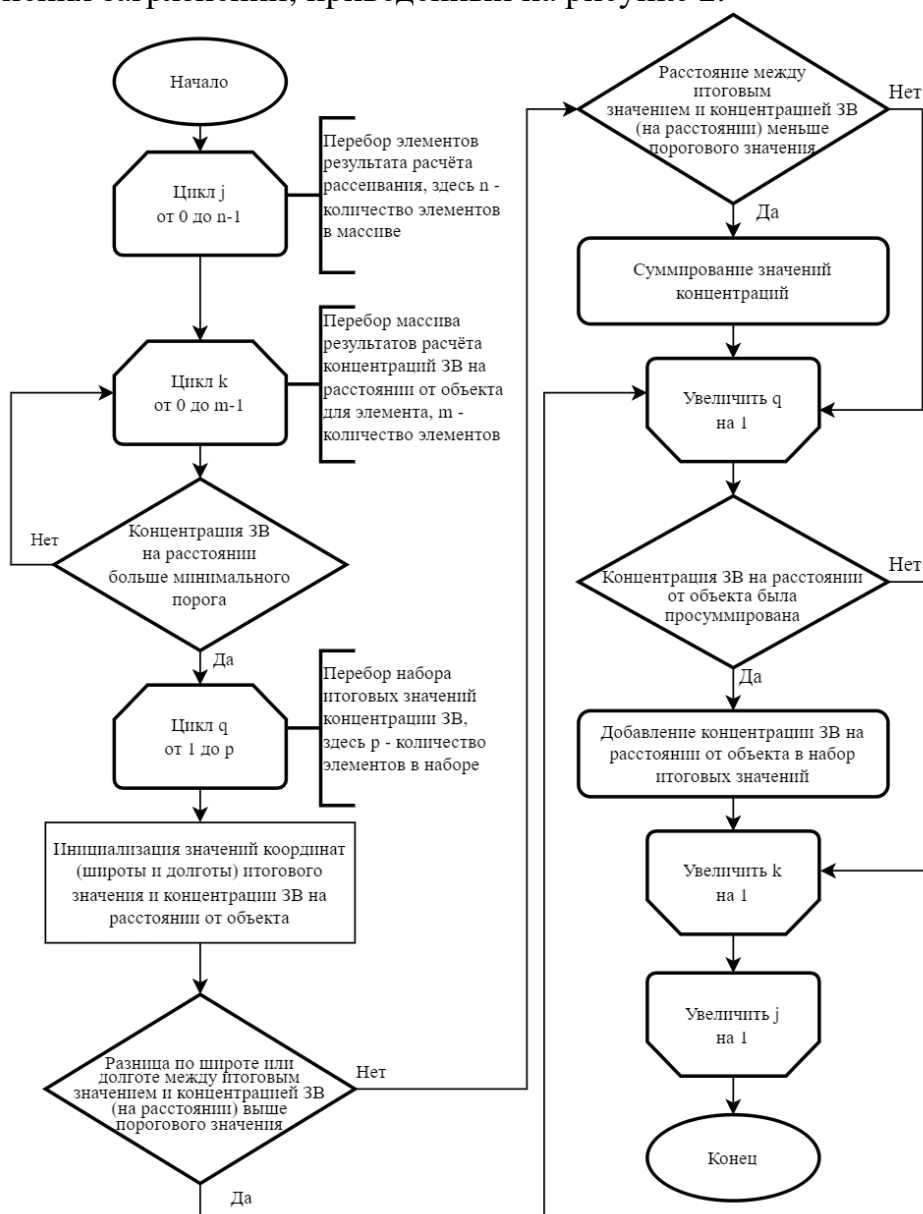


Рис. 2. Алгоритм пост-обработки результатов расчётов рассеивания загрязняющих веществ

Комментарии к рисунку 2: ЗВ на рисунке обозначает загрязняющее вещество; концентрации ЗВ на расстоянии от объекта – набор значений концентраций ЗВ с привязкой к географическим координатам, рассчитанных на расстоянии от объекта с определённым интервалом, по направлению ветра (с учётом изменения направления от времени); набор итоговых значений представляет из себя массив, элементы которого хранят координаты и агрегированное значение концентрации ЗВ в точке; пороговые значения могут быть заданы при создании расчёта, значения по умолчанию приведены в разделе 2.2 диссертации.

Предложена методика оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды объектами энергетики, включающая в себя следующие этапы:

1. Выполнение расчётов количественных показателей выбросов загрязняющих веществ от объектов энергетики.
2. Определение временного периода, для которого выполняется оценка экономического ущерба и, исходя из этого, выбрать подходящую нормативную методику.
3. Внесение необходимых сведений об объекте энергетики и ряда дополнительных сведений в зависимости от выбранной нормативной методики для оценки.
4. Определение оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды.

Формализованная модель ИВС и методика проектирования информационно-вычислительной системы на основе агентно-сервисного подхода. Формализованная модель $M_{ИВС}$ имеет вид:

$$M_{ИВС} = \{A_F, C_B, P_A, S_A, E_S\}$$

Для её построения необходимо:

- Составить перечень будущих агентов ИВС $\{A_F\}$ на основании множеств задач $\{T\}$ и функций $\{F\}$ системы.
- Разработать набор базовых компонентов ИВС $\{C_B\}$.
- Определить порядок вызова агентов $\{P_A\}$.
- Разработать сценарии вызова агентов $\{S_A\}$.
- Построить событийные модели $\{E_S\}$ для описания разработанных сценариев вызова агентов.

Представлена авторская методика проектирования ИВС в виде мультиагентной системы на основе агентно-сервисного подхода, включающая построение формализованной модели ИВС. Основные этапы методики включают в себя:

1. Описание системы, с учётом особенностей задачи. Для этого необходимо определить цель создания, выделить множество задач $\{T\}$, которые должна решать ИВС, определить множество функций ИВС $\{F\}$ на основе множества задач.
2. Построение формализованной модели ИВС.

3. Разработка архитектуры ИВС на основе формализованной модели и агентно-сервисного подхода.
4. Реализация ИВС с применением событийных моделей для описания агентных сценариев.
5. Тестовая отладка ИВС на содержательных примерах.

С применением предложенной методики была разработана архитектура ИВС для оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики, описанная в главе 3 (рис. 4). Для разработки сценариев вызова агентов $\{S_A\}$ и описывающих их событийных моделей $\{E_S\}$ была предложена методика интеграции семантических и математических моделей для поддержки исследований по оценке загрязнения окружающей среды объектами энергетики с использованием событийного моделирования², приведённая в разделе 2.6 диссертации. На рисунке 3 показана событийная модель, построенная на основе онтологий, и описывающая возможный агентный сценарий действий пользователя в ИВС. Сплошной линией обозначен нормальный процесс работы с ИВС, пунктирной – возврат на предыдущие этапы при необходимости внесения изменений (например, степени очистки или смены типа топлива), точечной – достижение пользователем цели работы и завершение работы. В приведённой модели показаны только основные события и процессы.

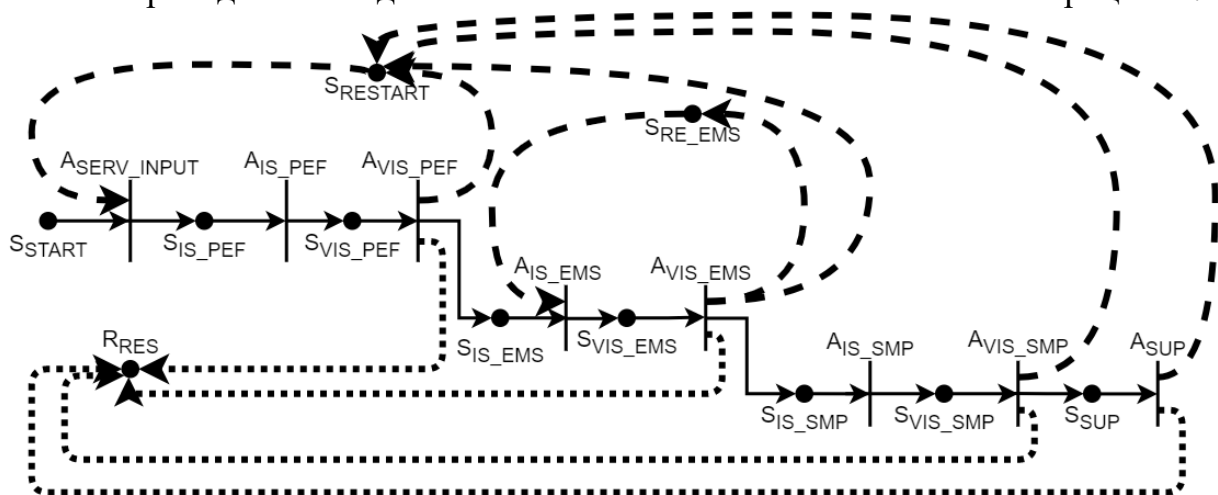


Рис. 3. Событийная модель, описывающая возможный сценарий действий пользователя в ИВС

Наименования процессов начинаются с буквы А, событий – с буквы S. Событийная модель (рис. 3) описывается при помощи 8 пусковых и 8 флаговых функций, примеры их описания приведены ниже:

Пусковая функция:

$$\Psi_{AVIS_{PEF}} = S_{VIS_{PEF}} \wedge \wedge (\overline{S_{RESTART}} \oplus \overline{S_{IS_{EMS}}} \oplus \overline{R_{RES}})$$

Флаговая функции:

$$\Phi_{AVIS_{PEF}} : (S_{VIS_{PEF}} := 0) \wedge ((S_{RESTART} := 1, S_{IS_{EMS}} := 0, R_{RES} := 0) \oplus (S_{RESTART} := 0, S_{IS_{EMS}} := 1, R_{RES} := 0) \oplus (S_{RESTART} := 0, S_{IS_{EMS}} := 0, R_{RES} := 1))$$

² Столяров Л.Н. Философия событийного моделирования на примере сценария энергетической катастрофы // Международная конференция «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе»: труды. Украина. Гурзуф. 2010. С. 197-200.

Одновременно с проектированием ИВС разрабатываются модели данных и, на основе онтологического подхода, проектируется база данных.

Модели данных и методика проектирования базы данных на основе онтологий. Автором предложена методика проектирования базы данных для оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики на основе онтологий:

1. Провести построение онтологической и инфологической моделей.
2. Определить объекты оценки и установить их внутреннюю иерархию на основе подсистемы онтологий об объекте энергетики.
3. Создать таблицы БД для каждого объекта иерархии.
4. Определить характеристики объекта оценки и создать поля в соответствующих таблицах.
5. Проанализировать онтологии выбранных методик расчета количественных показателей выбросов и расчета рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и создать таблицы расчета, включающие поля, соответствующие формуле расчета.
6. Определить перечень загрязняющих веществ от объекта оценки на основе методики расчета и подсистемы онтологий оценки выбросов.
7. Создать таблицы результатов расчета согласно онтологиям методик и перечню загрязняющих веществ.
8. На основе анализа онтологий методик расчёта создать таблицы для хранения вспомогательных данных, например, сведений о погодных условиях, рельефе.
9. На основе онтологий снегосъёмки создать соответствующие таблицы в базе данных.

В третьей главе рассмотрены разработка ИВС на основе предложенного методического подхода, предлагаемая технология оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики с использованием ИВС и исследования, выполненные с их применением. На рис. 5. представлена архитектура ИВС WICS.

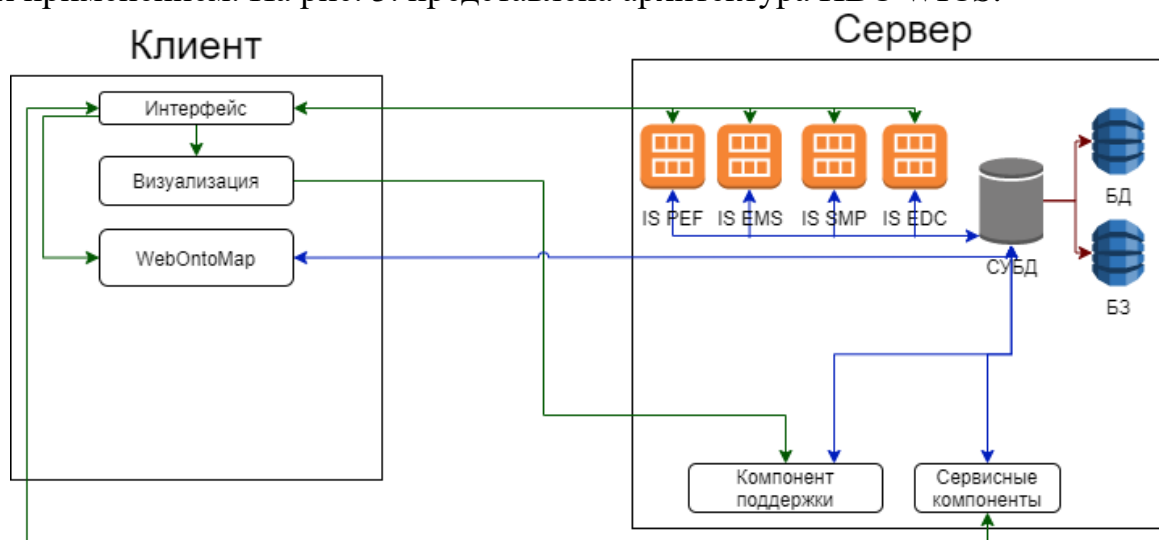


Рис. 4. Архитектура ИВС WICS для оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики

Web-ориентированная ИВС WICS разработана в виде клиент-серверного приложения. Серверная часть включает в себя: 1) *информационную подсистему IS PEF*, обеспечивающую выполнение количественного расчёта выбросов и оценку экономического ущерба; 2) *информационную подсистему IS EDC*, обеспечивающую выполнение оценки экономических ущербов, нанесённых окружающей среде; 3) *информационную подсистему IS EMS*, обеспечивающую выполнение расчёта рассеивания выбросов; 4) *информационную подсистему IS SMP*, обеспечивающую работу с пробами снега; 5) *компонент поддержки*, обеспечивающий работу эксперта при составлении рекомендаций; 6) *сервисные компоненты*, обеспечивающие работу с внешними источниками данных и предоставляющие средства для работы с базой данных; 7) *базу знаний (БЗ) и базу данных (БД)*, обеспечивающие хранение онтологий, исходных данных для расчётов и результатов расчётов. Клиентская часть ИАС включает в себя интерфейс для работы с пользователем, компонент визуализации результатов расчётов, а также компонент WebOntoMap для построения и просмотра онтологий. При разработке интерфейса были использованы понятия ситуационного исчисления.

Предлагаемая технология оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики представлена в таблице 1, подробное описание этапов приведено в главе 3 диссертации.

Таблица 1. Технология оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики

№	Этапы технологии	Методики	Инструментальные средства	Результаты этапа
1	<i>Подготовка данных</i>	-	Сервисные компоненты, база данных	Исходные данные для расчётов.
2	<i>Количественный расчёт выбросов</i>	Методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах	Компонент IS PEF	Показатели выбросов
3	<i>Оценка экономического ущерба от загрязнения окружающей среды</i>	Методики оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды	Компонент IS EDC	Оценки экономического ущерба
4	<i>Расчёт рассеивания выбросов</i>	Методы расчётов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих)	Компонент IS EMS, включая пост-обработку	Концентрации загрязняющих веществ

		веществ в атмосферном воздухе (МРР-2017)	результатов расчетов	
5	<i>Оценка показателей выбросов и рассеивания загрязняющих веществ</i>	Методика оценки загрязняющих веществ путем анализа проб снега	Компонент IS SMP Компонент визуализации	Табличное и визуальное представление результатов расчетов; Качественные и количественные оценки загрязненности окружающей среды
6	<i>Сравнение, анализ и принятие решений</i>	Экспертная оценки	Компонент поддержки Компонент визуализации	Рекомендации по снижению вредного воздействия на окружающую среду

Исследования и вычислительные эксперименты с применением предложенной технологии и разработанной ИВС. Вычислительный эксперимент в рамках выполненных исследований был проведен с использованием сведений о 48 объектах энергетики с различными характеристиками, расположенных в ЦЭЗ БПТ и использующих в качестве топлива уголь (на каждом объекте используются различные виды). Метеосведения взяты из базы данных сервиса Gismeteo, частота обновления погодных данных – 12 часов, сведения о рельефе – из базы данных сервиса Topocoding. Результаты анализа проб снега взяты из публикаций ЛИН СО РАН, ИГ СО РАН, БИП СО РАН, ФГБУ «Иркутское УГМС» и Государственных докладов. Результаты исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Агрегированные результаты исследования по ЦЭЗ БПТ

Объект	Выбросы всего, т/год	Твёрдые в-ва, т/год	SO ₂ , т/год	NO ₂ , т/год	Очистка, %	Установленная мощность, Гкал/ч
Слюдянский р-н	6080	5046	980	53	-	94.77
г. Слюдянка	5303	4482	770	51	-	77.58
Центральная котельная	2574	2156	388	30	45	43.08

Геоинформационное представление результатов расчетов показано на рис. 5 и 6.

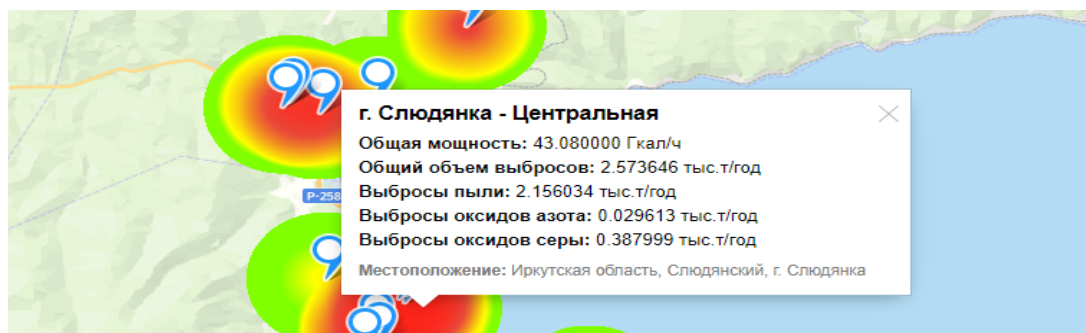


Рис. 5. Геовизуальное представление результатов расчетов выбросов в г. Слюдянка

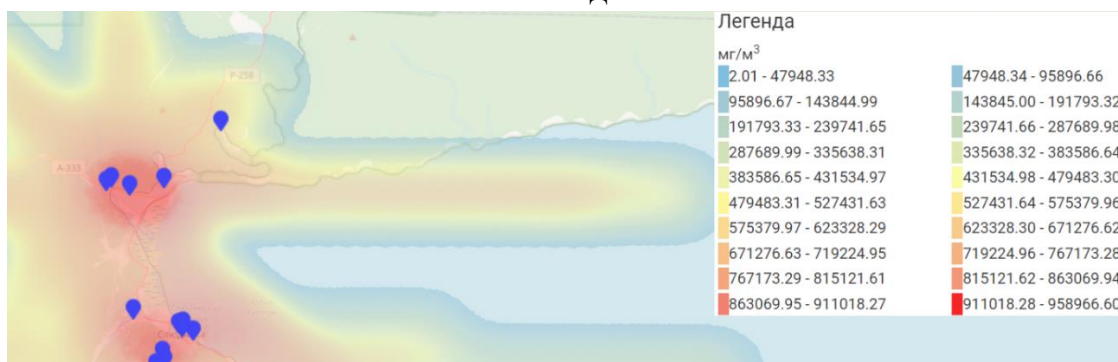


Рис. 6. Геовизуальное представление результатов расчетов рассеивания по Байкальской природной территории (SO₂)

На рисунках 5 и 6 синими маркерами обозначены объекты энергетики. На рисунке 5 – чем краснее область на карте, тем выше выброс от рассматриваемых объектов. Результаты на рисунке 6 получены с применением алгоритма пост-обработки результатов рассеивания ЗВ.

Приведены примеры рекомендаций для снижения негативного воздействия от объектов энергетики на окружающую среду, полученные на основании экспертных оценок, исходя из результатов исследования, выполнена оценка эффективности рекомендаций путём повторного выполнения расчётов с учётом этих рекомендаций.

В **заключении** приводятся основные результаты работы. В **Приложениях** приведены дополнительные примеры онтологий, результаты расчёта выбросов загрязняющих веществ объектами энергетики в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории, свидетельства о регистрации программ и баз данных, справка о внедрении результатов работы в ИЭ НАНБ, приведено руководство пользователя ИВС WICS, а также описание формата файла для загрузки результатов снегосъёмки в IS SMP.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Достигнута цель диссертационной работы: разработаны методический подход, алгоритмы и ИВС WICS для оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики и поддержки принятия решений по снижению их вредного воздействия.

Автором получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ существующих методов и моделей для оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики и подходов к построению ИВС.
2. Предложен методический подход для оценки загрязнений окружающей среды объектами энергетики, отличающийся интеграцией разрозненных методик и применением семантических технологий в рамках авторской ИВС и включающий:
 - систему онтологий, интегрирующую онтологии объектов энергетики и онтологии влияния объектов энергетики на окружающую среду;
 - принципы интеграции методик расчётов выбросов и распространения загрязнений;
 - алгоритмы расчётов выбросов и распространения загрязнений и оригинальный алгоритм пост-обработки результатов расчётов распространения загрязнений;
 - методику оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды объектами энергетики.
3. Предложены формализованная модель ИВС и методика проектирования ИВС на основе агентно-сервисного подхода, отличающаяся применением событийных моделей для описания агентных сценариев и применением онтологий для проектирования баз данных. На её основе была разработана агентно-сервисная архитектура и выполнены программная реализация ИВС WICS, базы знаний, хранящей систему онтологий, и реализация баз данных выбросов вредных веществ от объектов энергетики (DB PEF) и результатов снегосъёмки (DB SMP).
4. Разработана технология оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики на основе предложенного методического подхода и ИВС WICS.
5. С использованием разработанных технологии и инструментария выполнены исследования, основанные на серии вычислительных экспериментов, результаты которых показывают их применимость при формировании технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации объектов энергетики.
6. Выполнена интерпретация результатов вычислительных экспериментов и сформулированы, с их учетом, рекомендации по мероприятиям для снижения негативного воздействия действующих объектов энергетики на окружающую среду. Для предложенных рекомендаций была выполнена оценка эффективности в случае их реализации: влияние на снижение объёмов выбросов загрязняющих веществ и снижение экономического ущерба, наносимого атмосферному воздуху.
7. Результаты диссертационной работы применены при выполнении проектов по госзаданию ИСЭМ СО РАН, проектов, поддержанных грантами Российских (РФФИ и РФФИ) и международных (ЕАПИ) научных фондов и переданы в Институт энергетики НАН Беларуси.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 2.3.1:

1. **Кузьмин, В.Р.** Технология оценки загрязнений окружающей среды объектами энергетики с применением информационно-вычислительной системы WICS / В. Р. Кузьмин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 111-122.

2. **Кузьмин, В.Р.** Информационно-вычислительная система для оценки влияния объектов энергетики на окружающую среду / В.Р. Кузьмин, Л.В. Массель // Программные продукты и системы. – 2023. – Т. 36. № 1. – С. 60-70.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК по прочим специальностям и отраслям:

3. **Кузьмин, В. Р.** Оценка влияния выбросов от объектов энергетики на Байкальскую природную территорию / В.Р. Кузьмин, М.С. Зароднюк, Л.В. Массель // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26. № 1. – С. 70–80. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-70-80.
4. **Кузьмин, В.Р.** Применение агентно-сервисного подхода при разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений в энергетике / В.Р. Кузьмин, Ю.А. Загорулько // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2020. – Т.18. – № 3. – С. 5-18.

Статьи, индексируемые в Scopus и Web of Science

5. Massel, L.V. Tools for strategic decision support in energy sector based on situation management and semantic modeling / L.V. Massel, **V.R. Kuzmin** // Advances in Intelligent Systems Research T. 158, 5th International Workshop on Critical infrastructures - Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security (IWCI), 17-24 March 2018. – Baikalsk, Russian Federation. – pp. 129-135.
6. Massel, L. Situation calculus application in tasks of intelligent decision-making support / L. Massel, **V. Kuzmin** // RPC 2018 - Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications : 3, Vladivostok, 18–25 August 2018. – Vladivostok, 2018. – P. 8482131.
7. Massel, Liudmila. Knowledge management language in the information and analytical system for impact assessment of the energy on the geocology / Liudmila Massel, **Vladimir Kuzmin** // Advances in Intelligent Systems Research T. 166, 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS), 28-29 May 2019. – Ufa, Russian Federation. – pp. 321-325.
8. Massel, L. V. "Situation polygon" as an intelligent environment for strategic decision-making support in development of Russian energy sector / L. V. Massel, **V. R. Kuzmin** // Procedia Computer Science : 8, Heraklion, 24–28 June 2019. – Heraklion, 2019. – P. 308-318.
9. **Kuzmin, V.R.** Technology of impact assessment of energy on region's environment / V.R. Kuzmin, L.V. Massel // E3S Web Conf. Volume 289, 2021 International Conference of Young Scientists "Energy Systems Research 2021", 25 - 28 May 2021. – Irkutsk, Russian Federation. – pp. 03003. – DOI: 10.1051/e3sconf/202128903003.
10. **Kuzmin, V.R.** Methodical Approach for Impact Assessment of Energy Facilities on Environment / V. R. Kuzmin, L. V. Massel // Communications in Computer and Information Science. – 2022. – Vol. 1539. – P. 265-276. – DOI 10.1007/978-3-030-95494-9_22.

Статьи в рецензируемых изданиях

11. Massel, L.V. Web-based information system for the impact assessment of energy on the geocology of the region / L.V. Massel, **V.R. Kuzmin** // Scientific-Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0". – 2018. – № 213. – pp. 213-215.

12. Массель, Л. В. Разработка языка ситуационного управления на основе исчисления ситуаций / Л. В. Массель, **В. Р. Кузьмин** // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2018. – № 1(9). – С. 37-45.
13. **Кузьмин, В. Р.** Разработка информационной подсистемы для расчёта и визуализации вредных выбросов от объектов энергетики / В. Р. Кузьмин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 1(17). – С. 142-155.

**Свидетельства о государственной регистрации программ
для ЭВМ и баз данных**

14. Массель Л.В., Массель А.Г., **Кузьмин В.Р.** Информационная система для определения загрязнений от энергетических объектов (IS PEF). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666838 от 16.12.2019
15. Массель Л.В., Массель А.Г., **Кузьмин В.Р.** Интерпретатор языка ситуационного управления «Contingency Management Language» (ICML) Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020667564 от 24 декабря 2020 г.
16. Массель Л.В., Массель А.Г., **Кузьмин В. Р.**, Майсюк Е.П. База данных выбросов вредных веществ от энергетических объектов (DB PEF). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019622456 от 20.12.2019
17. Массель Л.В., Массель А.Г., **Кузьмин В.Р.** База данных результатов снегосъёма (DB SMP). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620267 от 02.02.2022
18. Массель Л.В., Массель А.Г., **Кузьмин В.Р.** Информационная система для оценки экономического ущерба от выбросов загрязняющих веществ объектами энергетики (IS EDC). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683217 от 02.12.2022.
19. Массель Л.В., Массель А.Г., **Кузьмин В.Р.** База данных оценок экономического ущерба от выбросов загрязняющих веществ объектами энергетики (DB EDC). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622952 от 18.11.2022.