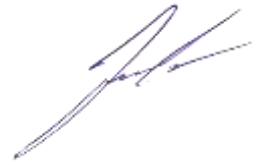


На правах рукописи



ПИМАНОВ Илья Юрьевич

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ И
ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

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

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) в лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании

Научный руководитель:

ЗЕЛЕНЦОВ Вячеслав Алексеевич,
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

Официальные оппоненты:

АЛЕКСЕЕВ Анатолий Владимирович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовой автоматики и измерений Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

ХОМОНЕНКО Анатолий Дмитриевич,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных и вычислительных систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Защита диссертации состоится 30 июня 2022 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.206.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, каб. 401, e-mail: dc@spcras.ru. Факс: (812) 328-44-50, тел: (812) 328-33-11.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в отделе аспирантуры (каб. 402а) Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, и на сайте <http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/>

Автореферат разослан 17 мая 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.206.01,
кандидат технических наук



АБРАМОВ
Максим Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. С развитием систем мониторинга и проактивного управления сложными природными и природно-техническими объектами (ППТО) как в нормальных условиях, так и при чрезвычайных ситуациях (ЧС), все более востребованными становятся задачи создания и автоматизации функционирования моделирующих систем, осуществляющих прогноз изменения состояния ППТО и информационно-аналитическую поддержку принимаемых решений по управлению. Примерами ППТО являются системы гидроэнергетики, зоны разработки полезных ископаемых, сельскохозяйственные земли и др. К числу наиболее характерных примеров ППТО относятся водные объекты и территории распространения наводнений с расположенной на них инфраструктурой.

Основу систем моделирования ППТО составляют сложные *распределенные* программные комплексы (ПК), задачи создания которых отличаются целым рядом особенностей:

1. Для описания ППТО все более широкое применение находит *комплексное моделирование*, основанное на использовании не одной, а семейства моделей, реализуемых соответствующими программными модулями (сервисами), каждый из которых предназначен для моделирования ППТО в конкретном диапазоне внешних условий. Применение методологии комплексного моделирования позволяет существенно улучшить показатели точности и достоверности прогнозов при наличии механизмов выбора моделирующих сервисов и их адаптации в процессе функционирования. Это приводит к необходимости создания новых алгоритмов и программных инструментов выбора и адаптации моделирующих сервисов в распределенных системах комплексного моделирования (РСКМ).

2. Для решения практических тематических задач моделирования ППТО требуется обеспечить *сквозную автоматизацию* всех этапов функционирования РСКМ для работы с системой пользователей - неспециалистов в области информационных технологий.

3. Рассматриваемые ПК требуют для своего функционирования интегрированного использования *больших объемов разнородных данных* – пространственных данных об анализируемых объектах, включая данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также непространственных (результатов измерений параметров внешней среды, и др.).

Необходимость совокупного учета перечисленных особенностей определяет *актуальность* задач разработки алгоритмического и программного обеспечения автоматизации функционирования РСКМ.

Степень разработанности темы. В настоящее время существует большое количество систем и сред моделирования для анализа функционирования сложных объектов, в том числе: AnyLogic, NetLogo, iWebsim, GPSS World, Powersim, Rand Model Designer, Modelica, HLA. Как правило, данные системы не предполагают выбора наиболее адекватных в каждый момент времени моделирующих сервисов. Научно-методическая база полимодельного подхода к описанию ППТО разрабатывается в рамках нового научного направления — квалиметрии моделей и полимодельных комплексов (Соколов Б.В., Микони С.В., Юсупов Р.М.). Показано,

что применение комплексного моделирования позволяет существенно улучшить качество РСКМ, при этом вопросы автоматизации комплексного моделирования находятся лишь в начальной стадии разработки. Актуальность использования комплексного моделирования подтверждается на конкретных примерах прогнозирования речных наводнений (Алабян А.М. и др., Emerton R.E., Emma Brown E., Bachmann D.). При этом эксплуатируемые системы моделирования European Flood Awareness System, Global Flood Forecasting Information System, Hydrological Predictions for the Environment Model, Iowa Flood Information System, ГИС «Амур», FluentHydro, программные комплексы STREAM 2D и ECOMAG, и другие, используют, как правило, одну конкретную модель (каждая система — свою) для соответствующего этапа моделирования ППТО. Также не предусмотрено решение задач совместного использования разнородных информационных ресурсов поставщиков данных, необходимых для функционирования ПК, и их интеграции с сервисами моделирования.

Целью диссертационной работы является повышение оперативности и точности решения тематических задач распределенными системами комплексного моделирования ППТО за счёт автоматизация их функционирования. Для достижения указанной цели в работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Анализ задач автоматизации комплексного моделирования ППТО и особенностей построения и функционирования ПК РСКМ.

2. Разработка алгоритмического и методического обеспечения для организации взаимодействия программных компонентов РСКМ на базе сервис-ориентированной архитектуры (СОА) и автоматизации функционирования РСКМ с учетом распределенности компонентов, их функционирования в гетерогенной информационной среде и необходимости выбора состава моделирующих сервисов в динамически изменяющейся обстановке.

3. Разработка программных средств, обеспечивающих автоматизацию функционирования распределенной системы комплексного моделирования.

4. Проведение экспериментальных исследований по апробации разработанного научно-методического и программного обеспечения автоматизации функционирования распределенной системы комплексного моделирования при прогнозировании речных наводнений.

При этом, решение задачи №2 состоит в разработке:

- способа алгоритмизации взаимодействия программных средств РСКМ;
- алгоритма формирования и технологии реализации функциональной структуры ПО РСКМ при решении тематических задач;
- способа интеграции разнородных данных в системах комплексного моделирования;
- методики валидации программных средств РСКМ речных наводнений на основе данных ДЗЗ.

Объектом исследования являются распределённые системы комплексного моделирования на базе сервис-ориентированной архитектуры и их реализация при прогнозировании речных наводнений.

Предметом исследования являются научно-методическое и программное обеспечение автоматизации функционирования распределённых систем комплексного моделирования.

Область исследования соответствует специальности 2.3.5. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Научная новизна результатов, полученных при решении поставленных задач, состоит в следующем:

1. Предложен способ алгоритмизации взаимодействия программных средств, основанный на новой интерпретации применения нотации BPMN для описания информационных процессов распределенной системы комплексного моделирования и позволяющий автоматизировать решение тематических задач этой системой на основе технологий визуального программирования.

2. Разработаны новые алгоритм формирования и технология реализации функциональной структуры ПО распределенной системы комплексного моделирования при решении тематических задач, позволяющие осуществлять обоснованное определение состава моделирующих сервисов в процессе функционирования системы на базе модели многокритериального выбора.

3. Разработан способ интеграции разнородных данных, необходимых для реализации технологий комплексного моделирования, отличающийся от известных формированием дополнительного слоя абстракции данных и позволяющий автоматизировать взаимодействие между сервисами моделирования и разнородными информационными ресурсами поставщиков данных.

4. Разработана методика валидации программных средств распределенной системы комплексного моделирования речных наводнений, отличающаяся от имеющихся применением алгоритма совместного использования программных средств обработки оптических и радарных данных ДЗЗ и метода контрольных точек и обеспечивающая непрерывное оценивание качества функционирования системы в автоматическом режиме.

5. Разработан полнофункциональный программный прототип ПК РСКМ на основе сервис-ориентированной архитектуры, позволяющий организовать совместную работу распределенных компонентов систем комплексного моделирования ППТО и впервые обеспечивший полную автоматизацию системы многомодельного оперативного прогнозирования речных наводнений.

Теоретическая и практическая значимость диссертации заключается в разработке научно-методического обеспечения и программно-технологических решений, базируясь на которых удалось с единых методологических позиций формально описать, алгоритмизировать, программно реализовать взаимодействие компонентов распределенных систем комплексного моделирования ППТО и полностью автоматизировать функционирование этих систем. Созданный программный комплекс позволяет существенно повысить оперативность и точность решения тематических задач распределенными ПК моделирования ППТО, что подтверждается результатами экспериментальных исследований применительно к системам прогнозирования речных наводнений.

Методология и методы исследования. В работе используются методы квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, многокритериального анализа и принятия решений, методы и технологии интеграции разнородных данных, методы объектно-ориентированного программирования, методы геоинформационного анализа. Программная реализация разработанных алгоритмов производилась на основе Linux-подобных операционных систем, технологий виртуализации и контейнеризации приложений, сервис-ориентированной и микросервисной архитектуры, высокоуровневых языков программирования и открытых программных библиотек.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ алгоритмизации взаимодействия программных средств распределенной системы комплексного моделирования.
2. Алгоритм формирования и технология реализации функциональной структуры ПО распределенной системы комплексного моделирования при решении тематических задач.
3. Способ интеграции разнородных данных в системах комплексного моделирования.
4. Методика валидации программных средств распределенных систем комплексного моделирования речных наводнений на основе использования данных дистанционного зондирования Земли.
5. Полнофункциональный программный прототип ПК РСКМ, обеспечивающий автоматизацию комплексного моделирования ППТО на примере оперативного прогнозирования речных наводнений.

Соответствие диссертации специальности. Представленные результаты соответствуют специальности 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

Степень достоверности результатов. Высокая степень достоверности научных положений, выводов и результатов диссертации обеспечивается всесторонним анализом состояния исследований в области создания алгоритмического и программного обеспечения комплексного моделирования сложных систем, согласованностью результатов разработки с результатами экспериментальных исследований созданного прототипа ПК, апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах и докладах на научно-практических конференциях, результатами внедрения разработанного алгоритмического и программного обеспечения.

Апробация и реализация результатов. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение реализовано в ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ФГБУ «Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», ФГБУН «Институт водных проблем РАН».

Результаты диссертации отражены в 16 научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, включая: грант РФФИ 17-11-01254, посвященный методологии создания и использования системы комплексного моделирования ППТО и ее реализации для прогнозирования речных наводнений» (2017-2019); международные проекты: InnoForestView (2019-2021) и WATERDRIVE (2021) по

Программам приграничного сотрудничества; «Интеграция-СГ-3.2.4.1» по разработке ПК интеграции данных от КА ДЗЗ в рамках Программы Союзного государства России и Беларуси (2021-2022); «Потребитель» по созданию системы обеспечения потребителей данными ДЗЗ (заказчик — АО «НИИ ТП» (Роскосмос)); 8 проектов по грантам РФФИ, посвященных разработке основ интегрированного наземно-космического мониторинга ППТО; проект ОНИТ РАН 2.11 по разработке основ прикладной квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, и др.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 30 международных и всероссийских конференциях, в том числе: «Имитационное моделирование. Теория и практика» (Санкт-Петербург, 2017, 2021); «European Modeling and Simulation Symposium» (Испания, 2017); «Computer Science On-line Conference» (2016, 2017, 2019); «Mapping Water Bodies from Space» (MWBS-2018, Италия), «Мультиконференция по проблемам управления» (Санкт-Петербург, 2019); «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации» (Санкт-Петербург, 2019); «Geo-Information for Disaster Management» (Чехия, 2019) и др.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 59 печатных работ, включая 5 публикаций в рецензируемых научных изданиях по специальности 2.3.5 (05.13.11) из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 13 публикаций в изданиях, индексируемых в WoS/Scopus, 11 свидетельств на регистрацию ПрЭВМ. Полный перечень публикаций соискателя по теме исследования представлен в Приложении А диссертационной работы.

Личный вклад соискателя. Основные научные положения, теоретические выводы и практические решения, результаты экспериментальных исследований сформулированы и изложены автором самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертация объемом 196 машинописных страниц содержит введение, четыре главы и заключение, список литературы (160 наименований), 5 таблиц, 39 рисунков, приложения со списком публикаций соискателя и копиями актов внедрения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность, сформулированы цели, задачи и методы исследования, представлена новизна, показана научная и практическая ценность, приведены основные результаты работы.

В первой главе проанализированы имеющиеся результаты по организации взаимодействия информационно-вычислительных систем, интеграции разнородных данных, сервис-ориентированному взаимодействию. Рассмотрены основные особенности задач сквозной автоматизации РСКМ ППТО и показано, что наиболее перспективной концепцией в данной области является применение систем *комплексного моделирования*, предполагающего использование не одной, а множества альтернативных моделей ППТО, каждая из которых наилучшим образом соответствует определенным внешним условиям или определенному

этапу функционирования ППТО. Реализация комплексного моделирования подразумевает наличие механизмов выбора моделирующих сервисов и настройки их параметров в процессе функционирования.

Для создания и обеспечения функционирования распределенного ПК РСКМ необходимо обоснование типа архитектурного построения ПК, а также разработка алгоритмов, методик и программных средств, обеспечивающих: (1) выбор и согласованное функционирование компонентов (модулей, сервисов) ПК; (2) интеграцию разнородных информационных ресурсов (данных), в том числе данных ДЗЗ, в процессе решения тематических задач (целевого функционирования) РСКМ; (3) валидацию ПК, обеспечение непрерывного оценивания качества расчетов в процессе функционирования РСКМ. Совместное решение этих задач применительно к созданию программных комплексов РСКМ рассматривается впервые.

Выполненные исследования показали, что системы рассматриваемого класса целесообразно строить на базе сервис-ориентированных архитектур. Стек используемых технологий должен также включать применение обмена сообщениями между компонентами РСКМ, реализацию адаптеров и медиаторов сообщений, технологий веб-картографии, использование битемпоральных баз данных и реестра сервисов.

В сервис-ориентированной архитектуре модули, отвечающие за решение расчетных и прогнозных задач, реализуются как веб-сервисы, причём при комплексном моделировании может быть несколько альтернативных сервисов для каждой расчётной функции. Каждому из таких сервисов могут быть поставлены в соответствие определенные значения показателей, характеризующих качество моделирования. Автоматизация РСКМ означает необходимость выбора сервисов, наилучшим образом выполняющих моделирование на каждом конкретном этапе функционирования системы. При этом, выбор конкретного состава сервисов и других необходимых компонентов ПО однозначно определяет функциональную структуру РСКМ.

Для формализации задачи выбора предлагается использовать теоретико-множественный подход, и определить следующие множества: $A = \{A_i, i \in N\}$, $N = \{1, \dots, n\}$ – множество наименований компонентов (модулей, сервисов), требуемых для функционирования РСКМ; $B = \{B_j^i, j \in D^i, D^i = \{1, \dots, m_i\}, i \in N\}$ – множество альтернативных вариантов i -го компонента; $c_{ij}, i \in N, j \in \{1, \dots, m_i\}$ – стоимость j -го варианта реализации i -го функционального компонента; $t_{ij}, i \in N, j \in \{1, 2, \dots, m_i\}$ – его оперативность; $p_{ij}, i \in N, j \in \{1, \dots, m_i\}$ – целевой показатель качества, в качестве которого чаще всего используется точность как количественная оценка степени расхождения между результатом моделирования и фактическим состоянием параметров ППТО.

Вариант функциональной структуры РСКМ обозначим $X = \|x_{ij}\|$, где $x_{ij} = 1$, если в качестве i -го компонента используется сервис B_j^i , и $x_{ij} = 0$, в противном случае.

В качестве целевых функций используется три группы показателей: затраты $C(X)$ на реализацию цикла расчетов, оперативность (длительность цикла расчетов

при решении тематической задачи) $T(X)$, и целевой показатель $P(X)$, отражающий качество функционирования ПК РСКМ (точность моделирования).

Тогда формирование функциональной структуры ПК РСКМ состоит в решении многокритериальной задачи выбора на дискретном множестве альтернатив:

$$\begin{aligned} & \min_{X \in \Delta} C(X), \min_{X \in \Delta} T(X), \max_{X \in \Delta} P(X), \\ C(X) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} c_{ij} x_{ij} & P(X) &= \min_{i \in N} \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} x_{ij} \\ T(X) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} t_{ij} x_{ij} & \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} &\leq 1, \forall i \in N \end{aligned} \quad (1)$$

В данной записи целевой показатель принимается равным минимальной из точностей, обеспечиваемых применяемыми сервисами, а последнее неравенство задает область Δ допустимых вариантов функциональной структуры РСКМ.

Предложенная постановка позволяет решать задачу автоматизации функционирования РСКМ не только с точки зрения обеспечения максимальной эффективности внутреннего вычислительного процесса ПК и организации взаимодействия его компонентов, но и с позиций достижения наилучших показателей использования ПК РСКМ по целевому назначению.

Во второй главе описывается разработанное алгоритмическое и методическое обеспечение автоматизации функционирования РСКМ. Для алгоритмизации информационных процессов взаимодействия компонентов РСКМ предложена технология формального описания бизнес-процессов BPMN (Business Process Model and Notation), обеспечивающая переход к автоматизации РСКМ под управлением сервисной шины на базе языка BPEL (Business Process Execution Language). Тем самым обеспечивается возможность использования языка визуального программирования и привлечение специалистов предметной области непосредственно для создания программных компонентов РСКМ.

Для определения конкретного состава компонентов РСКМ предложен алгоритм, основанный на решении задачи многокритериального выбора (1). Используется подход, основанный на поиске компромиссного решения:

$$X^k = \arg \min_{X \in \Delta} \max_{l \in L} \rho_l w_l(X), \quad (2)$$

где: L – множество частных показателей качества; ρ_l – весовые коэффициенты относительной важности частных показателей качества, удовлетворяющие условиям $\rho_l > 0$, $\sum_{l \in L} \rho_l = 1$; $w_l(u)$ – относительные отклонения от оптимумов показателей качества функционирования, $w_l = (f_l(\bullet) - f_l^0) / (f_l^* - f_l^0)$, где f_l^0 и f_l^* – соответственно наилучшее и наихудшее значения l -го показателя качества. Для решения задачи разработан прототип программного модуля на языке Python. Решение оптимизационных задач выполняется симплекс-методом и методом внутренней точки.

Демонстрация предлагаемого подхода выполнена на примере выбора функциональной структуры ПК системы многомодельного прогнозирования речных наводнений. Функциональная структура представлена графом на рис. 1. В

вершинах графа «А. Расчёт расхода воды» и «Б. Расчёт глубин в точках» расположены наименования операций, каждая из которых может быть выполнена одним из альтернативных сервисов: А-1 – Табличный расчёт, А-2 – Статистический расчёт, А-3 – Расчёт, основанный на нейросетевом подходе; Б-1 – Расчёт по модели среза, Б-2 – Расчёт по уравнениям Сен-Венана, Б-3 – Расчёт по нейросетевой модели. Результат расчетов выдается как в виде компромиссного решения, так и в виде таблицы недоминируемых решений (табл. 1).

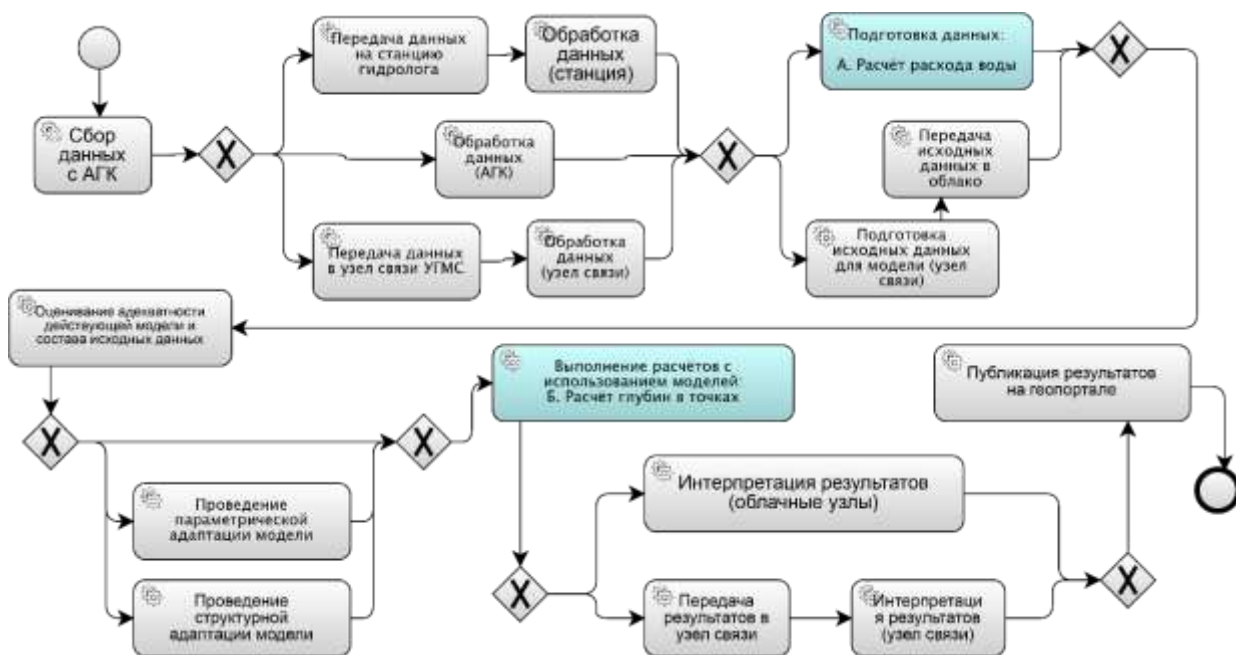


Рисунок 1 – Функциональная структура РСКМ для прогнозирования речных наводнений

Таблица 1 – Пример вывода результатов решения

Показатели	Значения показателей при разных вариантах выбора								
	1 (А3-Б3)	2 (А2-Б3)	3 (А1-Б3)	4 (А3-Б2)	5 (А2-Б2)	6 (А1-Б2)	7 (А3-Б1)	8 (А2-Б1)	9 (А1-Б3)
$\rho_1 w_1$ (точность)	0,000	0,300	0,000	0,063	0,300	0,063	0,142	0,300	0,142
$\rho_2 w_2$ (стоимость)	0,300	0,278	0,266	0,126	0,104	0,093	0,034	0,012	0,000
$\rho_3 w_3$ (оперативность)	0,000	0,024	0,259	0,047	0,071	0,306	0,141	0,165	0,400
Макс. отклонение	0,300	0,300	0,266	0,126	0,300	0,306	0,142	0,300	0,400

Предложенные алгоритм формирования и технология реализации функциональной структуры ПК РСКМ позволяют осуществлять обоснованное определение моделирующих сервисов в процессе функционирования ПК.

Отличительной особенностью решаемой в диссертации задачи является обеспечение сквозной автоматизации РСКМ, включая интеграцию необходимых исходных для моделирующих сервисов. Суть предложенного способа решения состоит в следующем. Порядок взаимодействия с внешними системами включает:

(1) формирование структуры исходных данных для каждой тематической задачи, (2) выполнение запросов к внешним системам, (3) получение данных, (4) нормализация и группирование полученных данных. Порядок этого взаимодействия показан на рис. 2. Здесь приведен пример для РСКМ речных наводнений. Основное решение, обеспечивающее выполнение интеграции разнородных данных, состоит в создании дополнительного слоя абстракции данных. Он показан пунктиром на рис. 2 и позволяет заменить сложные отношения М:М между поставщиками данных и ПК РСКМ на простые соотношения 1:М.

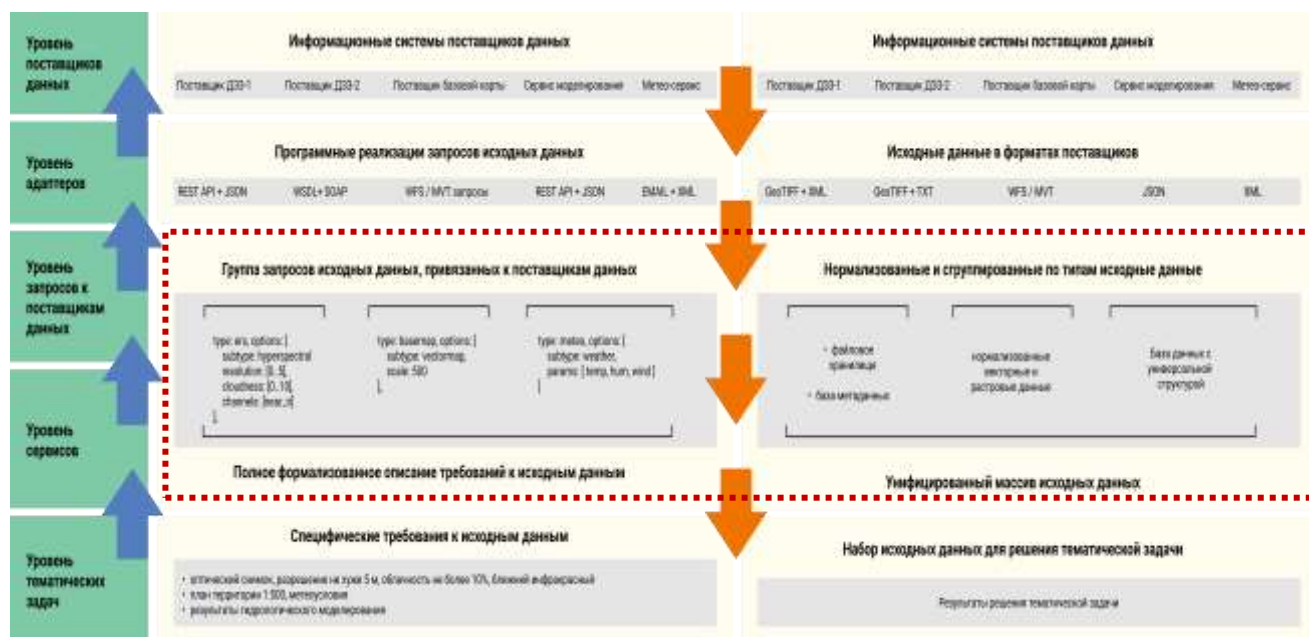


Рисунок 2 – Порядок взаимодействия ПК РСКМ с внешними системами при запросе и получении данных

Для примера семантическое описание компонента РСКМ в слое абстракции данных в формате JSON-LD представлено в листинге 1.

Листинг 1 – Пример семантического описания компонента РСКМ в слое абстракции данных в формате JSON-LD

```
{
  "@context": "https://schema.org",
  "@type": "CivicStructure",
  "name": "Каликино",
  "geo": {
    "@type": "GeoCoordinates",
    "latitude": "46.16",
    "longitude": "60.44"
  },
  "waterLevel": {
    "@type": "Observation",
    "measuredValue": "885",
    "observationDate": "2020-07-25T11:32:31"
  }
}
```

Для валидации функционирования ПК РСКМ предложена оригинальная методика и ее реализация применительно к системе оперативного прогнозирования

речных наводнений. Методика базируется на алгоритме совместного использования программных средств обработки оптических и радарных данных ДЗЗ и метода контрольных точек.

В основу алгоритма положено сочетание пороговой обработки радарных снимков по методу Оцу (Otsu) и вычисление индекса NDWI по данным оптической съёмки. Тем самым удается избежать неточностей, возникающих из-за облачности, и получить данные о затопленных участках на застроенных территориях.

Метод контрольных точек основан на сравнении результатов расчетов ПК с фактическими значениями параметров ППО, полученными в результате обработки данных ДЗЗ. Необходимым компонентом методики является расчетная сетка, покрывающая анализируемую территорию. Она предоставляется моделирующими сервисами, и в ее узлах задаются параметры моделей ППО, часть из которых являются настраиваемыми (рис. 3). Узлы сетки используются как контрольные точки для фиксирования текущей ситуации и её сравнения с результатами моделирования. Точность расчетов ПК вычисляется по соотношению $P = 100\% - N_e/N_T$, где N_e – количество узлов, в которых моделируемое состояние затопления не совпало с фактическим, N_T – общее количество узлов. По результатам оценивания при необходимости осуществляется подстройка моделирующих сервисов (рис. 4).

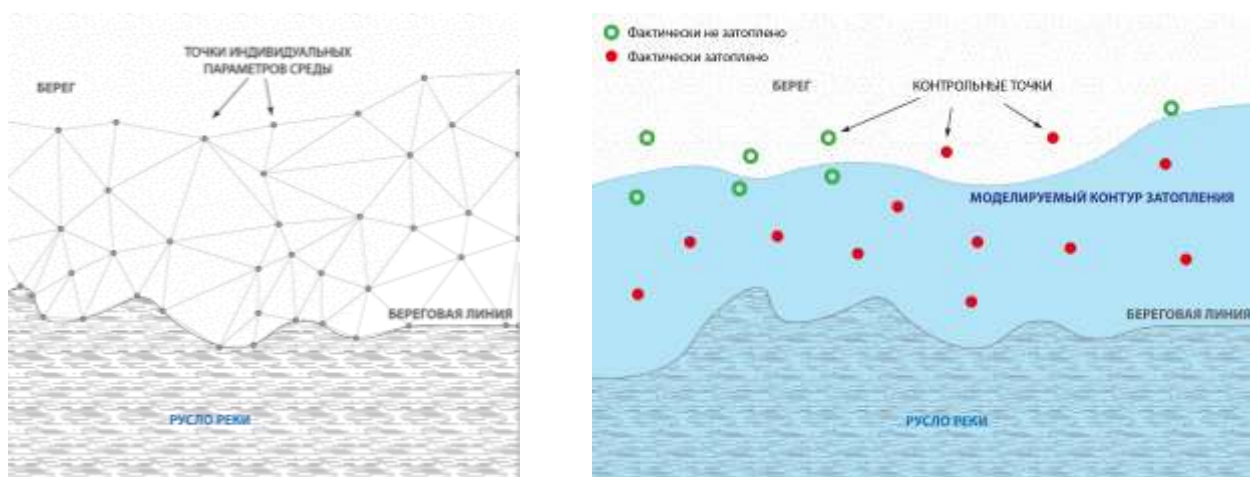


Рисунок 3 – Пример нерегулярной сетки для моделируемой ситуации речного наводнения

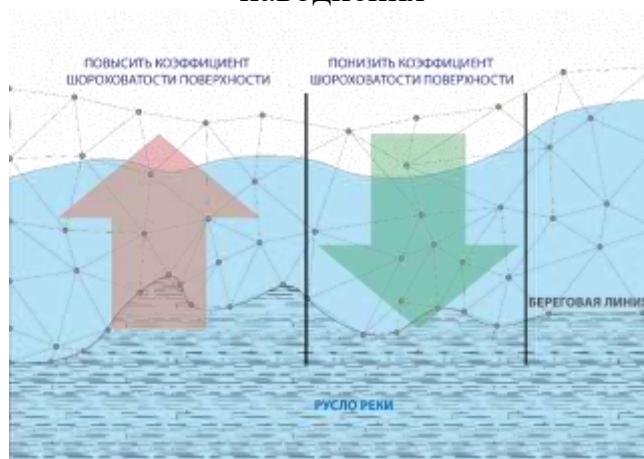


Рисунок 4 – Фрагмент результатов работы ПК РСКМ

Отличительная особенность методики – возможность проводить валидацию ПК и адаптацию моделей ППТО полностью в автоматическом режиме непрерывно в процессе функционирования РСКМ.

Третья глава посвящена описанию разработанного программного комплекса для автоматизации функционирования РСКМ и его конкретной реализации применительно к комплексному моделированию речных наводнений при решении задач оперативного прогнозирования зон и глубин затоплений.

Разработанный ПК является полнофункциональным программным прототипом РСКМ речных наводнений. При прогнозе наводнений он формирует ежечасный круглосуточный прогноз зон и глубин затоплений на 24–48 часов вперед в оперативном режиме; возможен также сценарный режим работы по принципу: что произойдет, если измерительные датчики зафиксируют то или иное значение уровня воды, или возникнет определенное сочетание ледовых заторов и их сходов.

Обобщенная архитектура ПК представлена на рис. 5. В основе реализации данной схемы лежит алгоритмическое и методическое обеспечение, разработанное в диссертации. Программное исполнение разработанных сценариев BPMN осуществляется встроенным в сервисную шину интерпретатором. Модуль многокритериального выбора моделирующего сервиса и его параметрической адаптации реализует алгоритм выбора функциональной структуры программного комплекса РСКМ и синтезирует для указанного интерпретатора файл BPMN. Пример такого файла приведен в листинге 2. Модуль универсального доступа к моделям и сервис-интерфейс к слою абстракции данных реализует способ интеграции разнородных данных в системах комплексного моделирования, используя при этом битемпоральное хранилище результатов и механизм адаптеров и медиаторов сервисной шины. Алгоритм совместного применения оптических и радарных данных ДЗЗ при определении границ зон затоплений задействуется в сервисе использования разнородных данных ДЗЗ, который, в свою очередь, также является поставщиком для слоя абстракции данных. Эти данные потребляются, в том числе, и модулем многокритериального выбора модели и её параметрической адаптации для реализации методики валидации программного комплекса РСКМ на основе данных ДЗЗ.

Листинг 2 - Пример фрагмента синтезированного BPMN файла

```
<serviceTask id="s005_init_data_discharge" name="Расчёт расхода воды">
  <extensionElements>
    <field name="serviceURL">
      <expression>http://172.16.5.29:12002/soap_api/ai.wsdl</expression>
    </field>
    <field name="input">
      <expression>e1505852-bf8f-11eb-8529-0242ac130003</expression>
    </field>
  </extensionElements>
</serviceTask>
```

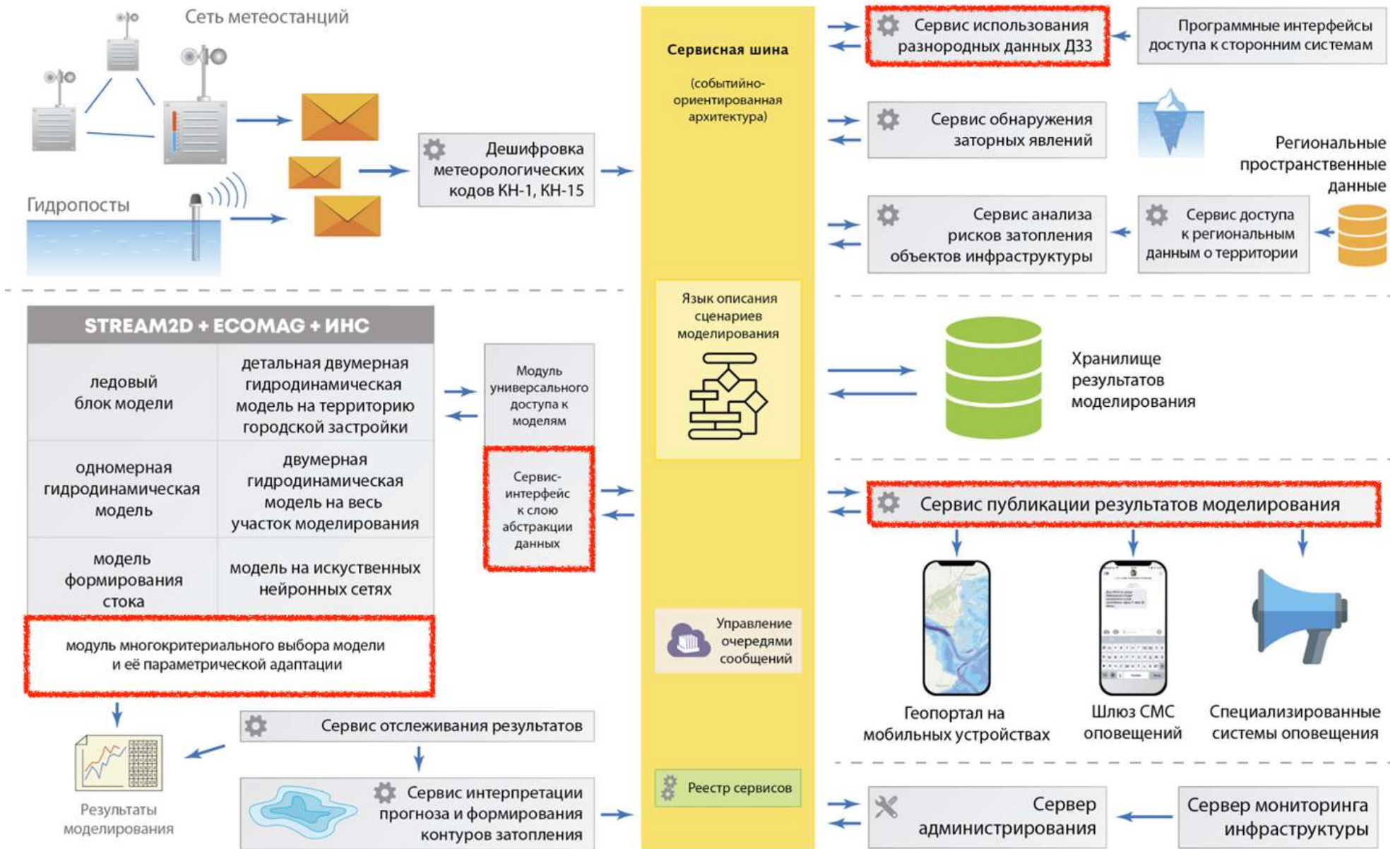



Рисунок 5 – Обобщённая архитектура РСКМ речных наводнений

Принципиальная отличительная особенность разработанного ПК заключается в полной автоматизации всех этапов работы распределенных компонентов системы комплексного моделирования и организации их совместной работы, включая загрузку данных, выполнение моделирования с определением зон и глубин затоплений, публикацию результатов на ГИС-платформе, определение состава попадающих в зону затопления объектов, персональное оповещение заинтересованных лиц. За счёт автоматизации и облегченного интерфейса обеспечивается максимальная простота работы с системой пользователя, не являющегося специалистом в области обработки данных, информационных и ГИС-технологий.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований, проведенных для апробации ПК, а также проверки реализуемости и эффективности предложенных в диссертации алгоритмических и программных решений по автоматизации функционирования РСКМ. Исследования проведены при мониторинге и прогнозировании речных наводнений на р. Северная Двина на исторических исходных данных 1998-2019 гг. и в режиме реальных наводнений в 2018 г. В том числе, выполнено опытное использование ПК в интересах исполнительных органов государственной власти Архангельской и Вологодской областей. Проведение экспериментов выполнялось при участии Северного управления УГМС, Администрации Архангельской области, Управления космического мониторинга НЦУКС МЧС России.

Созданный для экспериментальных исследований ПК РСКМ, обобщенная архитектура которого показана на рис. 5, включает в свой состав большое количество территориально распределенных компонентов, в том числе: несколько видов альтернативных моделирующих сервисов, основанных на разработках сотрудников Института водных проблем РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова (STREAM 2D и ECOMAG, разработчики – Беликов В.В. и Мотовилов Ю.Г., соответственно) и сервиса моделирования на основе искусственных нейронных сетей (ИНС, разработчик – Соболевский В.А.), созданного в СПб ФИЦ РАН; датчики гидрологических постов и автоматизированные гидрологические комплексы, расположенные на территории Вологодской и Архангельской областей, а также комплекс описанных выше разработанных и адаптированных программных модулей. Дополнительно выполнено создание программных оболочек для модулей гидрологического и гидродинамического моделирования.

Характеристика участка реки Северная Двина для проведения экспериментальных исследований показана на рис. 6. Полимодельный подход реализован в рассматриваемой системе за счет переходов между моделирующими сервисами, основанными на моделях ИНС и ECOMAG, а также переходов от одномерных гидрологических моделей к двумерным и обратно при изменении условий распространения воды.

В ходе экспериментов РСКМ апробирован в режимах оперативного и сценарного моделирования, а также в режиме поддержки принятия решений для оценивания потенциальных ущербов и автоматического генерирования печатных отчетов по установленному образцу. Вид интерфейса РСКМ при оперативном и сценарном режимах работы показан на рис. 7, в режиме поддержки принятия решений – на рис. 8. В правой части экрана отображаются значения уровней воды

на гидропостах, а в нижней части – временная шкала, при перемещении ползунка которой можно переходить от исторических данных по зоне разлива воды к результату прогноза на основе автоматически выбранных моделирующих сервисов. В оперативном режиме работа ПК осуществляется на базе поступающих значений уровней и расходов воды на гидропостах. При сценарном моделировании в систему вводятся требуемые значения уровней воды на гидропостах, и ПК визуализирует результат прогноза. В режиме поддержки принятия решений дополнительно визуализируется и документируется состав объектов инфраструктуры, попадающих в зону затопления.



Рисунок 6 – Характеристика участка русла р. Северная Двина для экспериментальных исследований

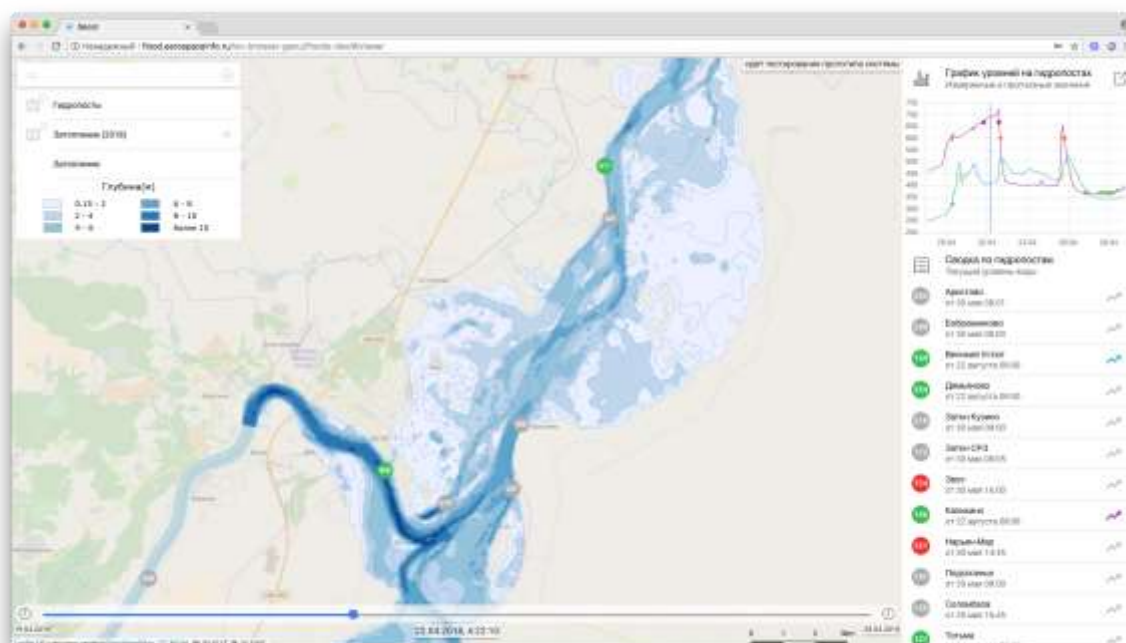


Рисунок 7 – Вид интерфейса РСКМ для оперативного и сценарного режимов работы

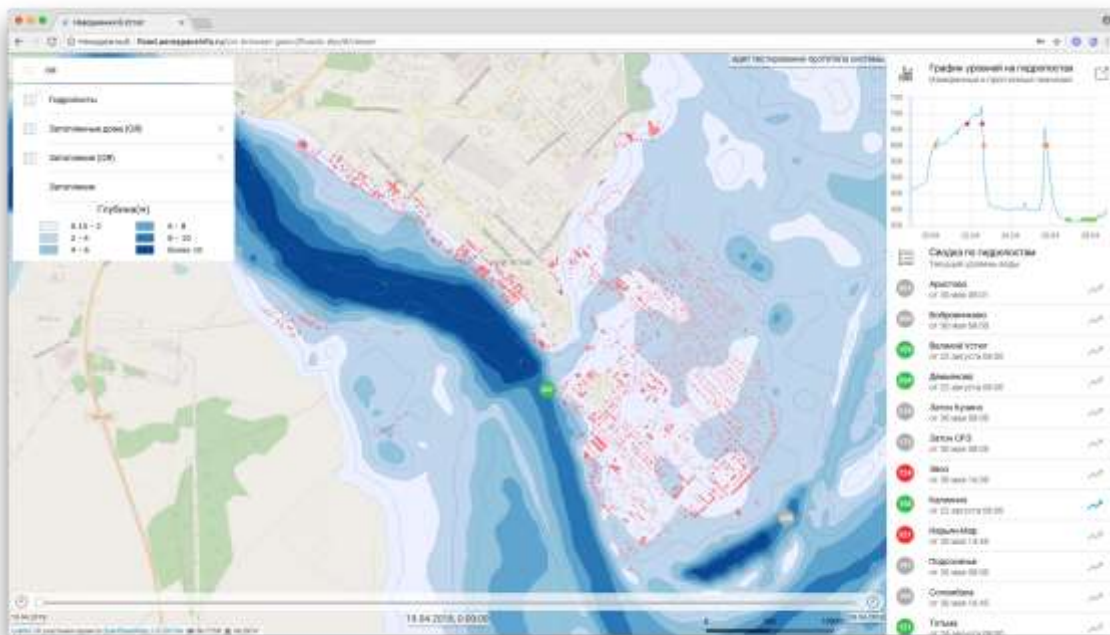


Рисунок 8 – Вид интерфейса РСМ в режиме поддержки принятия решений

В целом, результаты экспериментов показали реализуемость предложенных в диссертации алгоритмов, методик и программных средств при организации взаимодействия компонентов системы, и существенное улучшение качественных характеристик функционирования ПК систем моделирования: время предоставления результатов моделирования пользователям уменьшается с нескольких суток (при существующем способе обработки данных на средствах моделирования) до нескольких минут, точность результатов моделирования за счет непрерывной валидации ПК и оперативной подстройки параметров моделирующих сервисов возрастает с 80% до 92%, а также существенно снижаются требования к специальной квалификации пользователей РСМ за счет автоматического режима работы системы и удобства интерфейса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача разработки алгоритмического и программного обеспечения автоматизации функционирования распределенных систем комплексного моделирования природных и природно-технических объектов. Полученные научные результаты имеют важное значение для совершенствования методов и технологий создания распределенных программных комплексов моделирования ППТО и их функционирования в гетерогенной информационной среде. Результаты апробации и внедрения разработанного алгоритмического и программного обеспечения подтверждают достижение цели диссертационной работы – повышения оперативности и точности решения тематических задач распределенными системами комплексного моделирования ППТО за счёт автоматизация их функционирования.

Основные научные результаты, составляющие **итоги** исследования:

1. На основе сравнительного анализа существующих подходов, потенциально пригодных для формализации описания процессов взаимодействия компонентов

РСКМ на базе СОА, предложен способ алгоритмизации информационных процессов функционирования РСКМ на базе нотации описания бизнес-процессов BPMN. Данный способ обеспечивает учет основных особенностей построения ПК моделирования, распределенность его компонентов и динамический характер их взаимодействия, а также определяет возможность перехода к автоматизации этого взаимодействия под управлением сервисной шины на базе языка BPEL и технологий визуального программирования.

2. Разработан алгоритм формирования и технология реализации функциональной структуры ПО распределенной системы комплексного моделирования при решении тематических задач, позволяющий осуществлять обоснованное определение и применение моделирующих сервисов в процессе функционирования системы на базе модели многокритериального выбора.

3. Разработан способ интеграции разнородных данных, необходимых для реализации технологий комплексного моделирования, отличающийся формированием дополнительного слоя абстракции данных и позволяющий автоматизировать взаимодействие между сервисами моделирования и разнородными информационными ресурсами поставщиков данных.

4. Разработана методика валидации программных средств распределенной системы комплексного моделирования речных наводнений, отличающаяся применением алгоритма совместного использования программных средств обработки оптических и радарных данных ДЗЗ и метода контрольных точек, и обеспечивающая непрерывное оценивание качества функционирования системы в автоматическом режиме.

5. Разработан полнофункциональный программный прототип ПК распределенной системы комплексного моделирования на основе сервис-ориентированной архитектуры применительно к задаче оперативного прогнозирования речных наводнений. Принципиальная отличительная особенность разработанного ПК заключается в обеспечении полной автоматизации всех этапов работы распределенных компонентов системы комплексного моделирования и их совместного функционирования.

6. Разработанное алгоритмическое и методическое обеспечение, а также ПК РСКМ, прошли экспериментальную проверку при мониторинге и прогнозировании речных наводнений на р. Северная Двина на исторических исходных данных 1998-2019 гг. и в режиме реальных наводнений в 2018 г. Результаты экспериментальных исследований подтвердили повышение оперативности и точности результатов моделирования ППТО, достигаемые при использовании разработанного научно-методического и программного обеспечения: время предоставления результатов моделирования пользователям уменьшается с нескольких суток (при существующем способе обработки данных на средствах моделирования) до нескольких минут, точность результатов моделирования за счет непрерывной валидации ПК и оперативной подстройки параметров моделирующих сервисов возрастает в среднем с 80% до 92%, а также существенно снижаются требования к специальной квалификации пользователей РСКМ за счет автоматического режима работы системы и удобства интерфейса.

Даны **рекомендации** по использованию разработанных в рамках диссертационного исследования подходов при решении задачи прогнозирования речных наводнений.

Перспективой дальнейшей разработки темы по рассматриваемой проблематике является развитие методологии автоматизации комплексного моделирования с использованием концепции и технологий промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things, IIoT), базирующихся на описании и организации проактивного управления распределенными вычислениями большой сложности.

Полученные результаты соответствуют специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук:

По специальности представленной диссертации

1. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А, **Пиманов И.Ю.** Выбор архитектуры систем интеграции разнородных информационных ресурсов при комплексном моделировании природно-технических объектов // Информатизация и связь. 2021. № 7. С. 72-77. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-7-72-77.

2. **Пиманов И.Ю.** Автоматизация выбора функциональной структуры системы комплексного моделирования чрезвычайных ситуаций // Информатизация и связь. 2021. № 2. С. 15-21. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-2-15-21.

3. Зеленцов В.А., Пономаренко М.Р., **Пиманов И.Ю.** Тематические сервисы анализа состояния лесного покрова с использованием данных дистанционного зондирования из космоса // Информатизация и связь. 2020. №5. С.175-181. DOI: 10.34219/2078-8320-2020-11-5-175-181.

4. Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.** Управление информационными процессами в системах моделирования природных объектов // Информатизация и связь. 2020. №5. С.182-187. DOI: 10.34219/2078-8320-2020-11-5-182-187.

5. **Пиманов И.Ю.** Обеспечение доступа к данным дистанционного зондирования Земли из космоса при мониторинге и управлении развитием территорий // Информатизация и связь. 2019. №3. С.112-116. DOI:10.34219/2078-8320-2019-10-3-112-116.

По другим специальностям

6. Зеленцов В.А., Алабян А.М., Крыленко И.Н., **Пиманов И.Ю.**, Пономаренко М.Р., Потрясаев С.А., Семёнов А.Е., Соболевский В.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Модельно-ориентированная система оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 8. С. 831-843. DOI: 10.31857/S0869-5873898831-843.

7. **Пиманов И.Ю.** Программные инструментальные средства для комплексного моделирования при мониторинге и прогнозировании развития чрезвычайных ситуаций с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Изв.

вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 11. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-11-988-996.

8. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Пономаренко М.Р. Использование данных космического радиолокационного зондирования при анализе зон затопления в половодье // Инженерные изыскания. 2018. Том XII. № 7–8. С. 54–60, VOI: 10.25296/1997-8650-2018-12-7-8-54-60.

9. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., **Пиманов И.Ю.** Иерархическая система управления развитием территорий с использованием разнородных пространственных данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 11. С. 944–951.

10. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Семенов А.Е. Мониторинг и моделирование наводнений на базе системы с сервис-ориентированной архитектурой // ГеоРиск. 2016. № 1. С. 12-15.

11. Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., **Пиманов И.Ю.**, Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Ахтман Й. Основы построения системы обработки данных дистанционного зондирования Земли на базе сервис-ориентированной архитектуры // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 241-243.

12. Ponomarenko M.R., **Pimanov I.Yu.** Processing of SAR amplitude images with posting the results on web server // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(7), 994-1000. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-994-1000.

В изданиях, включенных в базу данных Scopus:

1. Potryasaev S.A., **Pimanov I.Y.**, Semenov A.E. Multi-criteria choice of the software package architecture for automating the analysis of the forest vegetation state // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 806. 2021. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012002.

2. Zelentsov V., Potryasaev S., **Pimanov I.**, Semenov A. Intellectual Information Platform bringing together diverse data and models for the interdisciplinary projects implementation and environmental management // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 509. 2020. 012061. DOI: 10.1088/1755-1315/509/1/012061.

3. Zelentsov V. A., Potryasaev S. A., **Pimanov I.Y.**, Ponomarenko M. R. Integrated use of GIS, remote sensing data and a set of models for operational flood forecasting // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLII-3/W8. 2019. P. 477–483. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-477-2019.

4. Potryasaev S., Zelentsov V., **Pimanov I.** Computational Processes Management Methods and Models in Industrial Internet of Things // Advances in Intelligent Systems and Computing. vol 1047. 2019. P. 266-276. DOI:10.1007/978-3-030-31362-3_26

5. Ponomarenko M.R., **Pimanov I.Y.** Implementation of Synthetic Aperture Radar and Geoinformation Technologies in the Complex Monitoring and Managing of the Mining Industry Objects // Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. CSOC 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017. Vol 574. P. 291-299. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-57264-2_30.

Монографии:

1. Микони С.В., Соколов Б.В. Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. М.: РАН, 2018. 314 с.

2. Zelentsov, V., **Pimanov, I.**, Potryasaev, S., Sokolov, B., Cherkas, S., Alabyan, A., Belikov, V., and Krylenko, I. N. River flood forecasting system: An interdisciplinary approach. In Flood Monitoring through Remote Sensing, 2018. Springer, Cham Cham, pp. 81–100 doi10.1007/978-3-319-63959-8_4

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

1. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Семенов А.Е.: Система автоматизированного заказа космической съёмки (САЗКС) Свидетельство №2018612740. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 26.02.2018.

2. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Семенов А.Е.: Программное обеспечение «Каталог-В» для автоматической каталогизации космических снимков. Свидетельство №2017612870. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.03.2017.

3. Соколов Б.В., Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Пащенко А.Е.: Распределенный программный комплекс автоматизации моделирования и прогнозирования наводнений. Свидетельство №2017612937. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06.03.2017.

4. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Пащенко А.Е. Программа «Унисон Про» для интеграции разнородных информационных ресурсов в системах поддержки принятия решений в различных предметных областях Свидетельство №2016660672. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 20.09.2016.

5. Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Зеленцов В.А., Соколов Б.В., Кожанов А.Н. Информационно-аналитическая система мониторинга и управления развитием территорий «Регион-В». Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство № 2016612635 от 02.03.2016.

Автореферат диссертации

ПИМАНОВ

Илья Юрьевич

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ
КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-
ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Текст автореферата размещен на сайтах:

Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего
образования Российской Федерации

<https://vak.minobrnauki.gov.ru/>

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской
академии наук»

<http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/>

Подписано в печать "28" апреля 2022 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 1,0. Тираж 70 экз.

Заказ № ____