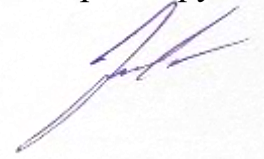


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр  
Российской академии наук»  
(СПб ФИЦ РАН)

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
**Зеленцов Вячеслав Алексеевич**

Санкт-Петербург – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
<b>1 АНАЛИЗ ЗАДАЧ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО- ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ .....</b>	<b>21</b>
1.1 Концепция комплексного моделирования природных и природно- технических объектов и особенности ее реализации при создании программных систем.....	21
1.2 Краткий анализ существующих систем и сервисов мониторинга и моделирования ППТО .....	30
1.3 Методы и технологии организации взаимодействия компонентов распределенных программных систем .....	37
1.3.1 Архитектура ПК распределенных систем комплексного моделирования.....	38
1.3.2 Технологии сервис-ориентированного взаимодействия в ПК РСКМ .... .....	40
1.3.3 Методы и модели интеграции разнородных информационных ресурсов.....	49
1.4 Постановка задачи исследований .....	56
1.5 Выводы по разделу 1 .....	64
<b>2 АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....</b>	<b>66</b>
2.1 Формализация описания функциональной структуры РСКМ на базе нотации BPMN .....	66
2.2 Алгоритм выбора функциональной структуры программного комплекса РСКМ.....	73
2.3 Способ интеграции разнородных данных в системах комплексного моделирования .....	81
2.4 Алгоритм совместного использования оптических и радарных данных ДЗЗ при определении границ зон затоплений .....	89
2.5 Методика валидации программного комплекса РСКМ на основе данных ДЗЗ .....	94
2.6 Выводы по разделу 2.....	102
<b>3 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СОСТАВЕ РСКМ РЕЧНЫХ НАВОДНЕНИЙ.....</b>	<b>104</b>

3.1	Состав и архитектура программного комплекса РСКМ на примере речных наводнений .....	104
3.1.1	Общий состав программного комплекса.....	104
3.1.2	Обобщённая архитектура программного комплекса .....	109
3.2	Особенности программной реализации компонентов РСКМ речных наводнений .....	112
3.2.1	Модуль многокритериального выбора модели и её параметрической адаптации .....	113
3.2.2	Сервис обнаружения заторных явлений .....	114
3.2.3	Сервис использования разнородных данных ДЗЗ.....	115
3.2.4	Сервис анализа рисков затопления объектов инфраструктуры.....	119
3.2.5	Сервис интерпретации результатов прогноза и формирования контуров затопления .....	120
3.2.6	Хранилище результатов моделирования.....	122
3.2.7	Сервис публикации результатов моделирования.....	124
3.2.8	Вспомогательные сервисы.....	125
3.3	Выводы по разделу 3 .....	126
4	<b>РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОЗДАНИЮ И АПРОБАЦИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РСКМ НА ПРИМЕРЕ РЕЧНЫХ НАВОДНЕНИЙ .....</b>	<b>128</b>
4.1	Общая характеристика экспериментальных исследований .....	128
4.2	Основные результаты апробации программного комплекса РСКМН.....	132
4.3	Выводы по разделу 4.....	155
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>157</b>
	<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>161</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>162</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>183</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>194</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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.*

Основу современных систем моделирования ППТО составляют сложные распределенные программные комплексы (ПК) с большим количеством компонентов, обеспечивающих сбор и интеграцию разнородных исходных данных, хранение данных, собственно моделирование, интерпретацию, визуализацию и распространение результатов.

Задачи создания таких ПК и организации взаимодействия их компонентов отличаются следующими основными особенностями:

1. В связи со структурной и функциональной сложностью ППТО и многообразием аспектов их взаимодействия с внешней средой, для точного и достоверного описания процессов их функционирования как в обычных условиях, так и в условиях ЧС, все более широкое применение находит комплексное моделирование, основанное на использовании не одной модели и соответствующего программного компонента (моделирующего сервиса), а полимодельного комплекса и семейства сервисов, в состав которых могут входить разнородные и комбинированные программные модули, причем каждый из них моделирует отдельные аспекты ППТО (либо существование ППТО в конкретных условиях), и оценивается своей системой показателей качества. *Применение методологии комплексного моделирование позволяет существенно улучшить показатели точности и достоверности прогнозов при наличии механизмов выбора моделирующих сервисов и их адаптации (настройки параметров) в процессе функционирования.* Это означает, что применение комплексного моделирования приводит к усложнению информационных процессов

взаимодействия компонентов ПК и необходимости создания новых алгоритмов и программных инструментов выбора и адаптации моделирующих сервисов.

2. В отличие от систем автоматизации научных исследований, при создании систем моделирования для решения задач управления (развитием территорий, чрезвычайными ситуациями, и др.) ключевым требованием является **обеспечение сквозной автоматизации** всех перечисленных выше этапов обработки данных и **максимальной простоты** для работы пользователя, который не является специалистом в области обработки данных и информационных технологий.

3. Используемые модели ППТО и соответствующие программные компоненты (сервисы) требуют для своего функционирования **больших объемов разнородных данных** – как пространственных данных об анализируемых объектах и территориях, включая данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), так и непространственных (результатов измерений параметров внешней среды, параметров ППТО, и др.). Поэтому создание и функционирование рассматриваемых ПК требует применения и развития технологий и программных средств интеграции разнородных данных, необходимых для проведения расчетов.

4. Рассматриваемые **системы моделирования** зачастую **должны функционировать практически в реальном масштабе времени**. Это определяет высокие требования к оперативности решения задач организации взаимодействия распределенных компонентов ПК и соответствующие требования к созданию программно-технологических решений для организации этого взаимодействия.

Необходимость совокупного учета перечисленных особенностей определяет актуальность рассматриваемых в диссертации задач разработки алгоритмического и программного обеспечения автоматизации функционирования распределенных систем комплексного моделирования (РСКМ).

К числу наиболее актуальных с точки зрения необходимости автоматизации относятся системы моделирования речных наводнений – как в силу колоссальных ущербов, наносимых наводнениями, так и по причине сложности создания ПК для автоматизации систем прогнозирования наводнений. Этим системам присущи все перечисленные особенности и связанная с ними сложность задач создания и

организации взаимодействия компонентов ПК для автоматизации. Поэтому системы моделирования речных наводнений рассматриваются в качестве базового примера для иллюстрации конструктивности практической реализации разрабатываемого в диссертации научно-методического и программно-технологического обеспечения.

**Степень разработанности темы.** В настоящее время существует большое количество систем и сред моделирования, на базе которых может быть описано функционирование сложных ППТО, среди них такие, как AnyLogic, NetLogo, iWebsim, GPSS World, Powersim, Rand Model Designer, Modelica, HLA. Все большее применение находят программные средства моделирования, основанные на методах искусственного интеллекта, в первую очередь, это искусственные нейронные сети. Однако, как правило, данные системы используются для описания функционирования объектов локально, не в составе распределенных комплексов, и не предполагают решения задач выбора наиболее адекватных в каждый момент времени моделирующих сервисов, а также не обеспечивают автоматизации полного цикла моделирования, включая автоматизацию интеграции необходимых исходных данных.

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.). При этом показано, что использование комплекса моделей и механизма динамического выбора наилучших моделей ППТО для каждой ситуации, определяемой изменением внешних условий, позволяет существенно улучшить качество информационной поддержки принимаемых решений по управлению объектами и развивающимися ситуациями на территории. Но вопросы практической реализации и автоматизации комплексного моделирования находятся лишь в начальной стадии проработки.

Актуальность использования комплексного моделирования подтверждается на конкретных примерах прогнозирования речных наводнений (Алабян А.М., и др.). Подобные подходы встречаются также и в зарубежных разработках (Emerton

R.E., Emma Brown E., Bachmann D.). Однако при этом рассматриваются, как правило, конфигурации с последовательным соединением программных модулей для решения задач различного типа (формирования стока, распространения воды по руслу), и недостаточно проработанными являются вопросы автоматизации выбора конкретных модулей (сервисов) из имеющегося множества, обеспечивающих решений одной и той же задачи наилучшим образом.

С точки зрения архитектурного построения, в соответствии с мировой практикой разработки систем автоматизации моделирования и информационных автоматизированных систем, для создания многокомпонентных систем и организации доступа к отдельным программным модулям, которые к тому же могут быть территориально распределены, рекомендуется использовать сервис-ориентированную архитектуру (СОА) (Биерштейн Н., Боуз С., Джон К.). Такой подход потенциально позволяет преобразовать большое количество частных программных интерфейсов поставщиков данных и сервисов к единому стандартному виду и на практике реализовать технологию комплексного моделирования ППТО (Потрясаев С.А.). Однако общей проблемой при создании распределенных систем данного класса является отсутствие инструментов для интегрированного использования разнообразных сервисов, предлагаемых большим количеством поставщиков данных и информационных платформ. Несмотря на устойчивый рост применения, практически отсутствуют системы на базе СОА, реализующие технологии комплексного моделирования.

Из эксплуатируемых на сегодняшний день систем моделирования ППТО наиболее близкими к предлагаемой разработке являются такие глобальные и международные системы, как система European Flood Awareness System (EFAS) - составная часть программы Copernicus Европейского космического агентства; системы Global Flood Forecasting Information System (GLOFFIS), Нидерланды; Hydrological Predictions for the Environment Model (HYPE), Швеция; Iowa Flood Information System (IFIS), США; Advanced Weather Interactive Processing System (AWIPS), разрабатываемая The National Weather Service, США, а также отечественные системы: ГИС «Амур» ФГБУ «Гидрометцентр России»,

FluentHydro ФГБУ ГГИ; программные комплексы STREAM 2D и ECOMAG Института водных проблем РАН, и ряд других. Архитектурно данные системы построены как локализованные монолитные решения, кроме того, они используют одну конкретную модель (каждая система - свою) для соответствующего этапа моделирования ППТО и развивающейся ситуации. Таким образом, в указанных системах вычислительные процессы организованы последовательно-параллельно, зачастую, без адаптации к текущей ситуации, в частности, без реализации выбора наиболее приемлемого моделирующего сервиса. Кроме того, в существующих системах не предусмотрено решение задач совместного использования разнородных информационных ресурсов поставщиков данных, необходимых для функционирования ПК, а также 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 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 по созданию алгоритмического и методического обеспечения автоматизации распределенных систем комплексного моделирования, состоит в разработке:

- способа алгоритмизации взаимодействия программных средств распределенной системы комплексного моделирования;
- алгоритма формирования и технологии реализации функциональной структуры ПО распределенной системы комплексного моделирования при решении тематических задач;
- способа интеграции разнородных данных в системах комплексного моделирования;
- методики валидации программных средств распределенных систем комплексного моделирования речных наводнений на основе данных дистанционного зондирования Земли.

**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, а также организовать взаимодействие компонентов распределенных систем комплексного моделирования ППТО, и полностью автоматизировать функционирование этих систем.

Созданный программный комплекс позволяет существенно повысить оперативность, автономность и точность решения тематических задач

распределенными ПК моделирования ППТО, что подтверждается результатами экспериментальных исследований применительно к системам прогнозирования речных наводнений.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач 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, сервисной шины, протоколов взаимодействия с разделяемым контрактом, реляционных баз данных, 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.

**Степень достоверности результатов.** Высокая степень достоверности научных положений, основных выводов и результатов диссертации обеспечивается всесторонним анализом состояния исследований в данной области,

согласованности теоретических выводов с результатами экспериментальной проверки алгоритмов, а также апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах и докладах на международных и всероссийских научно-практических конференциях.

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

Исследования, отраженные в диссертации, проведены в рамках 16 научно-исследовательских работ:

1. Гранты РФФИ: №13-07-12120, №13-08-00702, №15-08-08459, №16-07-00925, №16-08-00510, №17-01-00139, 17-08-00797, 17-06-00108, посвященные разработке научно-методических основ интегрированного наземно-космического мониторинга ППТО различного типа.

2. ОНИТ РАН 2.11 «Разработка методологических и методических основ прикладной квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, описывающих существующие и перспективные информационные системы (ИС) на различных этапах их жизненного цикла (ЖЦ)».

3. СЧ ОКР: «Планета-ПМ-СП» - «Перспективы интеграции информационных ресурсов отечественных космических средств в интересах решения задач прогнозирования и контрольного мониторинга»; «Потребитель» - «Создание системы обеспечения потребителей ДДЗЗ из космоса»,

4. Грант РФФИ 17-11-01254 «Методология и сервис-ориентированная технология создания и использования системы комплексного автоматизированного моделирования природных и природно-технологических объектов и ее реализация для оперативного прогнозирования речных наводнений» (2017-2019).

5. Проект «Выполнение работ по развитию фонда пространственных данных Ленинградской области», заказчик - АО «РНИЦ по Ленинградской области» (2018-2019).

6. Международные проекты (3): по Программе приграничного сотрудничества «Россия – Юго-Восточная Финляндия 2014-2020» - «Инновационные информационные технологии для анализа негативного воздействия на леса приграничного региона» (KS1309 InnoForestView - Innovative information technologies for analysis of negative impact on the cross-border region forests) (2019-2021); по Программе «Интеррег Регион Балтийского моря»: WATERDRIVE - Water driven rural development in the Baltic Sea Region (Развитие сельских территорий в регионе Балтийского моря в контексте управления водными ресурсами) (2021); по Программе Союзного государства России и Беларуси «Интеграция-СГ»: СЧ НИР «Разработка технологии и экспериментального образца программного комплекса комплексного применения данных от всех КА ДЗЗ орбитальной группировки России и Беларуси» («Интеграция-СГ-3.2.4.1») (2021-2023).

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 30 научно-практических конференциях: Международной конференции «Региональная информатика» (СПб, 2014), Всероссийской конференции «Экология. Экономика. Информатика» (Дюрсо, 2015), Научной сессии ГУАП (СПбГУАП, 2015), Всероссийской научной конференции с международным участием «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве» (СПб, 2015), Общероссийской конференции изыскательских организаций (СПб, 2015; Москва, 2018), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках Большого географического фестиваля (СПбГУ, 2015, 2018), конференции «Информационные технологии в управлении» (СПб, 2016), международной научной онлайн-конференции «Computer Science On-line Conference» (2016, 2017, 2019), Международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения» (СПбГУ, 2015, 2017), Белорусском космическом конгрессе (Минск, 2017), Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (СПб, 2017, 2021), Международной конференции «Quo vaditis agriculture, forestry

and society under global change?» (Чехия, 2017), Европейском симпозиуме по имитационному моделированию (European Modeling and Simulation Symposium) (Испания, 2017), Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Mathematical methods in engineering and technology) (СПб, 2018), Международном симпозиуме по наукам о Земле и дистанционному зондированию Земли (International Geoscience and Remote Sensing Symposium) (Испания, 2018), Международной научно-технической конференции «Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства» (СПб, 2018), 2-й международной конференции «Картографирование водных объектов из космоса» (Mapping Water Bodies from Space (MWBS-2018)) (Италия, 2018), 11-м международном симпозиуме «Цифровая Земля» (11<sup>th</sup> International Symposium on Digital Earth) (Италия, 2019), Мультиконференции по проблемам управления (Геленджик, 2019), Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации» (СПб, 2019), Всероссийской научной конференции с международным участием «Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения» (Нижний Новгород, 2019), Межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий» (Севастополь, 2019), Международной научно-практической конференции «Geo-Information for Disaster Management 2019» (Чехия, 2019), Всероссийской научной конференции с международным участием «Земля и космос» (СПб, 2020).

**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 автора.** Основные научные положения, теоретические выводы и практические решения, результаты тестирования 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.

### **Краткое 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** проведен анализ состояния разработок в области автоматизации комплексного моделирования ППТО в нормальных условиях и при возникновении ЧС. Проанализированы разработки по организации взаимодействия информационно-вычислительных систем аналогичного назначения, решения по интеграции разнородных данных, проблемы сервис-ориентированного взаимодействия. По результатам анализа сделан вывод о том, что существующие разработки не в полной мере отвечают требованиям к оперативности функционирования программных комплексов моделирования ППТО и точности результатов вследствие ограничений в части автоматизации полного цикла функционирования систем.

Рассмотрены основные особенности задач сквозной автоматизации систем моделирования ППТО и показано, что с методологической точки зрения наиболее перспективной концепцией для реализации существующих требований является применение подходов, основанных на автоматизации комплексного моделирования сложных объектов, предполагающего использование не одной, а множества моделей ППТО с реализацией механизмов выбора наиболее приемлемых моделирующих сервисов и настройки их параметров в процессе функционирования систем комплексного моделирования (СКМ). Проведенный

анализ задач комплексного моделирования ППТО подтвердил высокую актуальность исследований по его сквозной автоматизации, и разработке алгоритмического и программного обеспечения по организации взаимодействия программных компонентов, обеспечивающих функционирование используемого комплекса моделей ППТО, обеспечению расчётов необходимыми исходными данными, включая данные ДЗЗ, а также интерпретации и предоставления результатов пользователям.

Выполнено исследование различных типов архитектур СКМ и сделан вывод о том, что системы данного класса наиболее целесообразно строить на базе сервис-ориентированных архитектур. Принципиально важным является тот факт, что создаваемые для моделирования ППТО программные комплексы являются распределенными – как в смысле используемых вычислительных ресурсов, так и, зачастую, в физическом смысле, поскольку компоненты СКМ локализуются в территориально удаленных местах и организациях. Поэтому в диссертации в качестве основного объекта исследований рассматриваются распределенные СКМ (РСКМ), построенные на базе сервис-ориентированной архитектуры. При этом использованию данных ДЗЗ принадлежит особая роль, они зачастую являются единственным источником пространственных данных о состоянии моделируемых объектов и территорий. Однако, готовые к использованию сервисы поставки исходных данных ДЗЗ и соответствующие инструменты для их использования в РСКМ на сегодняшний день отсутствуют. В сервис-ориентированной архитектуре отдельные компоненты РСКМ, включая модули, отвечающие за решение расчетных и прогнозных задач, реализуются как веб-сервисы. Каждому из таких сервисов могут быть поставлены в соответствие определенные значения показателей, характеризующих качество моделирования. Это означает, что на программно-технологическом уровне задача выбора моделей трансформируется в задачу выбора состава сервисов, наилучшим образом отображающих изменение состояния ППТО в каждой конкретной ситуации.

Приводится общая постановка задачи диссертационных исследований, составной частью которой является задача алгоритмизации взаимодействия



компонентов ПК и выбора состава моделирующих сервисов, необходимых для обеспечения высокого качества решения комплексом тематических задач.

Обоснован выбор систем прогнозирования наводнений в качестве примера, на котором будет рассматриваться реализация конкретных научно-методических результатов и программно-технологических решений, разрабатываемых в диссертации. Данному типу РСКМ присущи все основные факторы, определяющие сложность создания ПК для комплексного моделирования и организации взаимодействия разнородных компонентов.

**Во второй главе** описывается разработанное алгоритмическое и методическое обеспечение автоматизации РСКМ. Для решения задачи алгоритмизации информационных процессов взаимодействия компонентов РСКМ предложена технология формального описания бизнес-процессов BPMN, обеспечивающая согласованное взаимодействие участников процесса моделирования и переход к автоматизации этого взаимодействия под управлением сервисной шины на базе языка BPEL. Тем самым обеспечивается возможность использования языка визуального программирования и привлечение специалистов предметной области непосредственно для создания программных компонентов РСКМ, и упрощение за счет этого процесса создания ПК при одновременном снижении числа субъективных ошибок, вносимых некорректной интерпретацией разработчиками постановок задач предметной области.

Для определения конкретного состава компонентов РСКМ в процессе ее функционирования предложен алгоритм, основанный на решении задачи многокритериального выбора, при этом в качестве показателей использованы оперативность, стоимость реализации цикла моделирования, а также целевой показатель эффективности моделирования, в качестве которого применительно к задаче прогнозирования наводнений используется точность получаемых результатов.

Отличительной особенностью постановки и решения исследуемой в диссертации задачи является обеспечение сквозной автоматизации РСКМ, включая разработку программно-технологических решений по сбору и интеграции

необходимых исходных для моделирования. В главе приводится способ интеграции исходных данных, основанный на формировании дополнительного слоя абстракции данных, что позволяет автоматизировать взаимодействие между сервисами моделирования и разнородными информационными ресурсами поставщиков данных.

Качество разработанных и реализованных программно-технологических решений в совокупности может быть оценено по итогам сравнительного анализа результатов работы ПК и фактического состояния анализируемых объектов и территорий. Для решения этой задачи в главе представлена методика валидации программных средств РСКМ на примере речных наводнений. Она основывается на алгоритме совместного использования программных средств обработки оптических и радарных данных ДЗЗ (как объективного источника информации о фактическом состоянии анализируемой территории) и метода контрольных точек, а также обеспечивает непрерывное оценивание качества функционирования системы в автоматическом режиме.

**Третья глава** посвящена описанию разработанного программного комплекса для автоматизации функционирования РСКМ и его конкретной реализации применительно к комплексному моделированию речных наводнений.

Описываемый ПК реализует предложенный способ интеграции разнородных данных, выбор состава сервисов РСКМ, технологии и программные средства интерпретации и предоставления результатов пользователям, и др., что в совокупности обеспечивает автоматизацию решения задач прогнозирования изменения состояния объектов и территорий при использовании полимодельного подхода. ПК РСКМ при прогнозе наводнений 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.

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 с гидропостов (автоматизированных гидрологических комплексов) и метеоданных, формирование контуров и глубин затоплений, их публикацию на ГИС-платформе, выполнение моделирования с определением зон и глубин затоплений, 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 гидрологии, обработки данных, информационных и ГИС-технологий. В систему оперативно загружаются космические снимки с российских и зарубежных спутников дистанционного зондирования Земли. Обработанные и опубликованные космоснимки дают возможность оценить точность работы ПК и оперативно настроить параметры моделирующих сервисов.

**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 в интересах исполнительных органов государственной власти Архангельской и Вологодской областей для оперативного прогнозирования весенних паводков и в ходе упреждающих действий по их ликвидации. Проведение экспериментов выполнялось при участии Северного управления УГМС, Администрации Архангельской области, Управления космического мониторинга НЦУКС МЧС России.

Созданная для экспериментальных исследований РСКМ включала в свой состав большое количество территориально распределенных компонентов, в том числе: несколько видов альтернативных моделирующих сервисов, основанных на разработках Института водных проблем РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова и

сервиса моделирования на основе искусственных нейронных сетей, разработанного в СПб ФИЦ РАН; датчики гидрологических постов и автоматизированные гидрологические комплексы, расположенные на территории Вологодской и Архангельской областей; а также комплекс разработанных и адаптированных программных модулей для загрузки и интеграции разнородных исходных данных, выбора состава моделирующих компонентов, интерпретации и визуализации результатов расчетов в ГИС, расчета потенциального ущерба и оповещения пользователей, валидации ПК при его функционировании.

В ходе экспериментов РСКМ апробирован в нескольких режимах: (1) круглогодичного мониторинга и прогнозирования (полностью автоматический режим работы); (2) сценарного моделирования, при котором оператор может внести в систему интересующие условия и получить результат; (3) поддержки принятия решений – для оценивания потенциальных ущербов и автоматического генерирования печатных отчетов по установленному образцу.

Приведенные результаты экспериментов показали реализуемость предложенных алгоритмов, методик и программных средств при организации взаимодействия компонентов системы и существенное улучшение качественных характеристик функционирования 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 РСКМ за счет автоматического режима работы системы и удобства интерфейса.

# **1. АНАЛИЗ ЗАДАЧ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

## **1.1. Концепция комплексного моделирования природных и природно-технических объектов и особенности ее реализации при создании программных систем**

С развитием систем проактивного управления сложными природно-техническими объектами, а также мониторинга 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 [1, 2, 3, 4].

ППТО рассматривается как совокупность природных, природно-техногенных и техногенных объектов, условия существования которых взаимосвязаны и взаимозависимы [5, 6, 7], а функционирование существенно зависит от пространственных характеристик их составных частей и от времени.

Примерами ППТО являются объекты как естественного происхождения, так и возникшие в результате техногенной деятельности человека. В ходе освоения человеком ресурсов нашей планеты все больше естественных экосистем превращаются в ППТО. Примерами таких объектов могут являться системы гидроэнергетики, зоны разработки полезных ископаемых, водные объекты и территории распространения наводнений с расположенной на ней технологической инфраструктурой, территории лесов с зонами негативного воздействия от лесных пожаров, болезней и близости дорог и населенных пунктов, и др.

Состояние ППТО определяется комплексом природных и техногенных факторов. Моделирование является основным методом изучения и прогнозирования поведения ППТО при изменениях их структуры, параметров и внешних условий, т.к. ввиду различных причин непосредственное воздействие на ППТО зачастую невозможно или нежелательно [7]. Для этого используются такие программные продукты (системы и среды моделирования) как, например, AnyLogic, NetLogo, iWebsim, GPSS World, Powersim, Rand Model Designer,

Modelica, HLA и др. [8, 9]. Все большее применение находят программные средства моделирования, основанные на методах искусственного интеллекта, в первую очередь, это искусственные нейронные сети. Однако, в связи с тем, что ППТО – это сложные и многоаспектные объекты, разработка и использование универсальной модели высокоточного описания их функционирования является сложно достижимой целью.

Так, при моделировании речного наводнения состав и объем требуемых входных данных и соответствующих им информационных ресурсов напрямую зависит от типа решаемой гидрологической задачи (например, задачи прогнозирования половодья, паводка, нагона или волны прорыва и др.) и величины интервала прогноза. Для выполнения долгосрочного и среднесрочного прогнозирования необходимы сложные модели и значительные объемы входных данных (в частности - характеристики снежного, почвенного и растительного покрова на площади водосбора, метеорологические характеристики и др.). Долгосрочный и среднесрочный прогноз, как правило, предоставляет обобщенную оценку гидрологической обстановки на исследуемой территории, контуры вероятных областей затопления, рассчитанные для различных сценариев развития ЧС, и гидравлические параметры водного потока в зоне затопления. Однако границы, глубины и время затопления конкретных участков не могут быть определены с достаточной точностью вследствие зачастую недостаточной достоверности исходной информации (особенно данных о метеорологических и климатических факторах), хотя именно эти данные в первую очередь необходимы при организации и выполнении аварийно-спасательных мероприятий, а также для информирования населения потенциально опасных районов [10].

В силу имеющихся трудностей с обеспечением сложных универсальных моделей исходными данными, зачастую используются упрощенные подходы. Примером упрощённого варианта моделирования речного наводнения является геоинформационное моделирование [11], использующее инструменты пространственного анализа и позволяющее определить изменения пространственных характеристик рассматриваемого вида ППТО. Данные

инструменты реализуют алгоритмы расчета площадей водосбора, выделения бассейнов разных порядков, формирования потоков, анализа уклонов, используются при построении цифровых моделей рельефа, поверхностей загрязнений, оценки зон видимости. Но несмотря на многообразие возможностей, предоставляемых универсальным геоинформационным программным обеспечением, за такого рода универсальность приходится расплачиваться существенным упрощением расчетных схем и, как следствие, низкой точностью результатов моделирования.

Как показывает опыт проведенных исследований [10, 12], наилучший результат зачастую обеспечивают частные специализированные модели, отражающие только определенные аспекты функционирования ППТО, либо их описание в заданном диапазоне внешних условий, или для конкретной территории, однако, количество таких аспектов может быть значительным.

В целом, проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что точное и достоверное описание функционирования ППТО как в штатных условиях, так и в условиях ЧС целесообразно выполнять на основе КМ с применением не одной модели, а полимодельного комплекса (ПМК), в состав которого входят разнородные и комбинированные модели, оцениваемые отдельными системами показателей качества. Использование такого подхода обусловлено структурной и функциональной сложностью ППТО и многообразием аспектов их взаимодействия с внешней средой [6, 13, 14].

Комплексное моделирование ППТО – «методология и технологии полимодельного описания указанных объектов, а также комбинированного использования методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных управленческих решений, связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых объектов в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок» [14]. Научно-методическую базу полимодельного подхода составляет квалиметрия моделей и полимодельных комплексов [13].

Достижение требуемой точности и достоверности описания функционирования ППТО при применении полимодельного подхода (т.е. при реализации КМ) базируется на комбинированном использовании моделей, каждая из которых даёт лучший результат для конкретных условий обстановки, и правильном их сочетании, включающем оценивание качества моделей, выбор наиболее эффективных моделей на каждом этапе моделирования, настройку параметров моделей в ходе их эксплуатации. Использование данного подхода усиливает эффективность работы одних моделей и нивелирует ограничения других [6].

Актуальность использования КМ также подтверждается на примере прогнозирования речных наводнений на освоенных участках речных долин. Анализ существующих исследований показывает отсутствие единой универсальной модели, которая бы описывала процессы развития наводнений на участках рек, характеризующихся различной протяжённостью и конфигурацией. Так, для участков речных долин длиной 100-1000 км используются одномерные гидродинамические модели; если протяженность участков составляет менее 100 км и также характеризуется значительной шириной русел и пойм, их сложной конфигурацией, наличием различных сооружений в руслах и поймах, то применяются двумерные модели [10, 12, 15, 16]. Проведенные исследования подтверждают, что использование одномерной и двумерной моделей для совместного (гибридного, комплексного, многомасштабного) расчёта значительно экономит силы и средства при анализе и мониторинге протяжённых участков рек [10, 17].

Подобные подходы встречаются также и в зарубежных разработках [18]. Однако при этом рассматриваются, как правило, конфигурации с последовательным соединением моделей для решения задач различного типа (формирования стока, распространения воды по руслу), и недостаточно проработанными являются вопросы выбора конкретных моделей из имеющегося множества, обеспечивающих решений одной и той же задачи наилучшим образом.



Общая схема подхода, реализующего методологию КМ, приведена на рисунке 1.1, где:

- 1 – формирование целей и требований к результатам оперативного прогнозирования наводнений;
- 2 – получение (формирование) входных данных (сценариев входных воздействия);
- 3 – формирование целей моделирования;
- 4 – моделируемая система (объект–оригинал  $Ob_{\langle \rangle}^{op}$ );
- 5 – модели  $Ob_{\langle \theta \rangle}^m$  исследуемой системы  $Ob_{\langle \rangle}^{op}$ ;
- 6 – оценивание качества модели (полимодельных комплексов);
- 7 – управление качеством моделей;
- 8 – управление параметрами моделей;
- 9 – управление структурами моделей;
- 10 – изменение концепции описания моделей (изменение границ в паре объект–среда) [10, 19, 20, 21, 22].

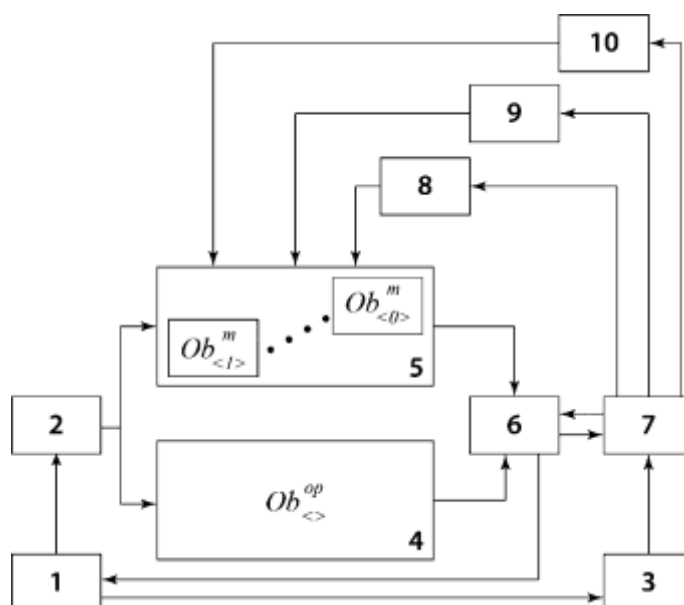


Рисунок 1.1 – Обобщённая схема оценивания моделей и управления их качеством

Как видно из представленной схемы, хотя применение полимодельного подхода потенциально повышает точность и достоверность результатов прогнозирования, оно также приводит к дополнительным сложностям, а именно - необходимости создания средств выбора, согласования и настройки моделей. Указанные особенности моделирования ППТО (особенно в условиях ЧС) и требуемая оперативность выполнения моделирования диктуют необходимость применения средств автоматизации при решении задач моделирования [6].

Основными проблемами, требующими решения при КМ и его автоматизации, являются:

1. Необходимость согласования используемых моделей и алгоритмов «на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях» [14], а также разработки алгоритмов и программных средств оценивания моделей и выбора наиболее предпочтительных сервисов (приложений) для моделирования на каждом этапе решения задач [23], а также организации взаимодействия всего комплекса программ, используемого для автоматизации комплексного моделирования.

2. Необходимость разработки средств интегрированной обработки и использования разнородных данных, включая данные дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ). Использование ДЗЗ является одной из ключевых особенностей задачи, поскольку ППТО принципиально являются территориально-распределенными системами. Дистанционное зондирование является существенным, а иногда единственным источником данных, необходимых для функционирования программных комплексов (ПК) автоматизации. Наличие такого рода данных определяет гетерогенность информационной среды функционирования ПК.

3. Необходимость решения вопросов, связанных с отчуждением программных модулей ПМК от разработчиков.

4. Необходимость обеспечения удобного доступа к результатам КМ.

5. Необходимость максимальной автоматизации полного цикла моделирования – от задания требований к разнородным исходным данным для

расчета в моделях до оповещения заинтересованных пользователей и формирования отчетов.

Рассмотрим указанные проблемы более подробно.

*Проблема 1: Необходимость согласования моделей*

Несмотря на то, что сегодня существует целый ряд инструментальных средств и сред автоматизации моделирования, возможности которых постоянно совершенствуются за счёт применения интеллектуальных информационных технологий, на данный момент отсутствуют общепринятые механизмы согласования используемых моделей как на техническом, так и на глубоком семантическом уровне, что ограничивает комбинированное использование перечисленных средств в рамках КМ [8].

Однако, при этом средства автоматизации КМ «либо ориентированы на решение узко специализированных классов прикладных задач при широкой функциональности предоставляемых сервисов, либо являются достаточно универсальными средствами автоматизации моделирования, в которых координация разнотипных моделей, методов и алгоритмов анализа и синтеза сложных объектов осуществляется не на глубинном (модельно-алгоритмическом) уровне описания, а через ЛППР в интерактивном режиме на уровне программного и информационного обеспечения. Другими словами, в последнем случае проводится не интегративное, а коммуникативное взаимодействие, не обеспечивающее появление синергетических эффектов в виде появления новых знаний, получаемых при интегративном комплексном моделировании» [14].

*Проблема 2: Необходимость интегрированной обработки и использования разнородных данных, включая ДДЗЗ*

Требования к качеству прогнозирования состояния ППТО, особенно жесткие в условиях ЧС, определяют состав используемых моделей и, соответственно, исходных данных для выполнения КМ, т.к. от наличия полной и достоверной информации о развитии ЧС на территории зависит уровень достоверности и качества результатов КМ, а также оперативности их получения. В частности, оперативная настройка параметров, используемых моделей и ПМК, модельные

расчёты и верификация результатов моделирования требуют применения актуальных данных о рассматриваемых ППТО, получаемых в оперативном режиме. С целью получения наиболее полной картины развития ЧС используются соответствующие наземные, морские, воздушные и космические системы мониторинга состояния ППТО, данные краудсорсинга и др. Учитывая тот факт, что зона распространения ЧС может быть значительна, особую актуальность приобретает дистанционное зондирование Земли из космоса, обеспечивающее возможность выполнения регулярного площадного мониторинга обширных территорий с высоким пространственным и временным разрешением. Т.е., состав информационных ресурсов для КМ ЧС характеризуется разнородностью, большими объемами данных и зачастую территориальной распределенностью поставщиков данных (например, гидрологических станций, метеостанций, и др.), и их эффективное применение требует наличия соответствующих алгоритмов и программных средств для автоматизации сбора, обработки и дальнейшего совместного анализа, а также использования при решении задач КМ.

*Проблема 3: Необходимость решения вопросов отчуждения программных модулей ПМК от разработчиков*

Необходимость включения программных модулей, реализующих ПМК, в вычислительные процессы решения тематических задач в ходе программной реализации КМ зачастую приводит к отчуждению этих модулей от их разработчиков и переносу моделей на другие носители/новые аппаратно-программные комплексы и т.д., что связано с вынужденной локализацией требуемых модулей на рабочем месте конкретного специалиста (например, оператора по обработке данных ДЗЗ) или применении дополнительной информации (к примеру, данных наземного мониторинга и пр.), источники которой зачастую приурочены к конкретным организациям [24]. Такая постановка приводит к возникновению субъективных и административных препятствий на пути формирования целостной информационной системы комплексного моделирования. Поэтому в современных условиях существует необходимость программной реализации КМ, позволяющей минимизировать степень отчуждения

модулей от их разработчиков, обеспечивая стабильность их функционирования и возможность оперативной удаленной настройки.

*Проблема 4: Необходимость обеспечения удобного доступа к результатам КМ*

Эффективность средств автоматизации моделирования во многом определяется удобством представления его результатов ЛПР, т.к. зачастую именно этот фактор определяет оперативность анализа ситуаций, связанных с ЧС, и принятие мер по их управлению. Анализ существующих систем прогнозирования ЧС показал, что для большинства из них характерен «перегруженный» инструментами интерфейс, работа с которым требует от ЛПР специальных знаний не только в области конкретной ЧС, но также в сфере ИТ, ГИС, ДЗЗ и т.д., и снижает оперативность получения и оценки результатов прогноза. Повышение эффективности средств автоматизации КМ также требует пересмотра базовых подходов к организации доведения информации до потребителей. Для решения всего комплекса проблем предоставления пользователям необходимых продуктов и сервисов прогнозного мониторинга необходимо обеспечить интеграцию ресурсов и сервисов – «бесшовную» для конечного пользователя. Интерфейс должен быть максимально прост и настроен на возможность описания постановки задач и запроса на языке предметной области (сейсмопрогноз, прогноз наводнений, и т.д.). В этой связи очевидной становится необходимость разработки программных средств, использующих функциональность не только настольных ГИС, но и веб-технологий, при этом адаптированных под нужды ЛПР и условия работы с ними.

*Проблема 5: Необходимость сквозной автоматизации*

Также остается нерешённой проблема «лоскутной автоматизации», характерной для сложных и распределённых систем мониторинга и моделирования ППТО (в частности – для автоматизированной информационно-управляющей системы Единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС (АИУС РСЧС) [25] и др.), функциональные элементы которых зачастую создаются и развиваются отдельно и независимо, а возможности их взаимодействия в составе одной системы существенно ограничены [26].

Таким образом, методология КМ априорно является перспективной с точки зрения возможности выполнения требований, предъявляемых к достоверности и оперативности прогнозирования состояния ППТО в создаваемых системах и программных комплексах. При этом, проведенный анализ задач КМ показал высокую актуальность исследований по его сквозной автоматизации, организации функционирования используемого комплекса компонентов (программных средств), выполняющих моделирование ППТО, обеспечение расчетов необходимыми исходными данными, включая данные ДЗЗ, а также интерпретацию и предоставление результатов пользователям.

## **1.2. Краткий анализ существующих систем и сервисов мониторинга и моделирования ППТО**

К настоящему моменту в РФ и за рубежом разработано достаточно большое количество систем мониторинга и моделирования ППТО, которые нашли наибольшее распространение при анализе чрезвычайных ситуаций. Являясь наиболее востребованными именно в данной области, они одновременно являются и наиболее сложными, поскольку предназначены для поддержки принятия управленческих решений практически в реальном масштабе времени и в условиях динамически изменяющейся обстановки.

Поэтому дальнейший анализ будет проведен, прежде всего, применительно к системам мониторинга и прогнозирования состояния ППТО в условиях ЧС. Особенно динамично развиваются информационные системы и сервисы космического мониторинга ЧС, использующие данные дистанционного зондирования Земли из космоса (ДДЗЗ) в качестве основного источника информации [27, 28, 29, 30]. Это обусловлено тем, что ДДЗЗ дают возможность оперативно получить площадные данные о состоянии ППТО на всей анализируемой территории, независимо от ее пространственного расположения и размера, что соответствует требованиям, предъявляемым к мониторингу ЧС.

К числу наиболее известных зарубежных примеров подобных систем относятся:

1. Copernicus Emergency Management Service (CEMS) – Сервис управления чрезвычайными ситуациями, в состав которого входят модули [31]:

- Global Flood Awareness System (GloFAS) – глобальная система оповещения о наводнениях [32];
- European Flood Awareness System (EFAS) – европейская система информирования о наводнениях) [33];
- European Forest Fire Information System (EFFIS) – европейская система мониторинга пожароопасной ситуации в лесах [34];
- Drought Observatory – сервис мониторинга и прогнозирования засухи [35];
- Rapid Mapping – сервис оперативного картографирования зон ЧС [36];
- Risk & Recovery Mapping – сервис, предоставляющий пространственную информацию на территорию ЧС для управления ЧС и организации аварийно-восстановительных работ [37].

2. ESA Thematic Exploitation Platform (TEP) – серия разработанных Европейским космическим агентством тематических информационных платформ [38], в состав которой входят:

- Geohazards TEP для мониторинга и анализ георисков [39];
- Hydrology TEP для наблюдения и анализа гидрологических объектов [40], включающая Flood Monitoring Service – сервис мониторинга наводнений [41].

3. NASA Disasters Mapping Portal – портал картографирования ЧС [42].

4. Fire Information for Resource Management System (FIRMS) – сервис, предоставляющий информацию о пожарах [43].

Среди отечественных разработок в области систем мониторинга и прогнозирования ЧС, включающих использование ДДЗЗ, можно выделить следующие:

1. «Карта пожаров» («Сканэкс») – сервис для обнаружения и распознавания возможных очагов пожаров и пожароопасных ситуаций на территории России [44];

2. «ВЕГА-Science» (Институт космических исследований РАН) – сервис мониторинга и анализа растительного покрова, в том числе включающий данные о пожарной ситуации (очаги пожаров, площади выгоревших территорий) [45].

3. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства («ИСДМ-Рослесхоз»), направленная на мониторинг природных пожаров и их последствий [46].

4. Геоинформационная система (ГИС) «Каскад» – система космического мониторинга ЧС МЧС России, включающая данные о пожарах [47].

5. Информационные продукты «Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «Планета» (ФГБУ «НИЦ «Планета»), занимающегося обработкой данных отечественных КА гидрометеорологического, океанографического, гелиогеофизического назначения и мониторинга окружающей среды, а также приемом и обработкой данных с зарубежных КА [48].

6. Единая территориально-распределенная информационная система дистанционного зондирования Земли (ЕТРИС ДЗЗ) – сеть, объединяющая наземные комплексы, центры, пункты приема, обработки и распространения данных ДЗЗ различных органов, ведомств, организаций и их информационные ресурсы и тем самым обеспечивающая координацию их деятельности и согласованное функционирование [49].

7. Автоматизированная информационно-управляющая система Единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС (АИУС РСЧС) – территориально распределенная многоуровневая многопользовательская автоматизированная система, используемая МЧС России для сбора, комплексной обработки и обмена оперативной информацией о ЧС, а также передачи органами повседневного управления необходимых указаний силам и средствам ликвидации ЧС [25].

8. Аппаратно-программный комплекс (АПК) технических средств «Безопасный город» – комплексная информационная система, включающая такие функции, как: прогнозирование, мониторинг, предупреждение и ликвидацию возможных угроз; контроль устранения последствий ЧС и правонарушений;



интеграция действий информационно-управляющих подсистем дежурных, диспетчерских, муниципальных служб для их оперативного взаимодействия в интересах муниципального образования; концепция АПК «Безопасный город» предполагает широкое использование космических систем навигации и ДЗЗ [50].

В связи с тем, что к числу наиболее характерных задач моделирования ЧС относится задача оперативного прогнозирования наводнений, рассмотрим более подробно современные технологии и системы мониторинга и прогнозирования наводнений.

К наиболее известным зарубежным информационным системам, предполагающим использование математических моделей, относятся [18]:

- глобальная система оповещения о наводнениях – Global Flood Awareness System (GloFAS) [32];

- глобальная информационная система прогноза наводнений – Global Flood Forecasting Information System (GLOFFIS) [18];

- глобальная система гидрологического прогноза на основе модели Hydrological Predictions for the Environment Model (HYPE) [51];

- сервис погоды Национального управления океанических и атмосферных исследований США – National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) National Weather Service [52], включающий инструменты расширенного гидрологического прогнозирования;

- европейская система оповещения о наводнениях – European Flood Awareness System (EFAS) [33];

- австралийский сервис прогнозирования и оповещения о наводнениях (Flood Forecasting and Warning Service) [53], и некоторые другие.

Из российских разработок в области автоматизации мониторинга и моделирования гидрологической обстановки, в первую очередь, необходимо отметить:

- разработки Росгидромета, включающие средства и технологии автоматизации обработки и управления большими объемами гидрометеорологических данных, автоматизации прогноза уровней воды,

визуализации на основе ГИС-технологий и предназначенные, прежде всего, для профессиональных пользователей [54];

– разработки ФГБУ «Государственный гидрологический институт» по автоматизации инженерных гидрологических расчетов и применению геоинформационных технологий для визуализации результатов гидрологического моделирования [55];

– OpenLevels и OpenForecast [56, 57, 58];

– Система прогнозирования и раннего предупреждения о наводнениях «Черноморское побережье Кавказа-Кубань» (СПН «ЧПК-Кубань») [59];

– «ГИС Амур» [60];

– система автоматизированной системы мониторинга, прогнозирования и анализа гидрологических рисков «Паводок 2.0» [61];

– автоматизированная система мониторинга паводковой ситуации на территории Краснодарского края [62];

– «Мониторинг весеннего половодья в бассейне Камы» [63].

Отдельно следует отметить работы по созданию комплекса средств автоматизации гидрологического моделирования в бассейне реки Амур, выполняемой совместно сотрудниками Тихоокеанского института географии ДВО РАН, Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института, ОАО «РусГидро» и Института водных проблем РАН [64]. В данных разработках большое внимание уделяется автоматизации сбора и систематизации данных о гидрологической обстановке, формированию цифровой модели рельефа (ЦМР) на исследуемые участки русла, применению отечественных комплексов моделирования для прогнозирования развития возможных ЧС.

Несмотря на проводимые разработки и большой объём и разнообразие собираемых, обрабатываемых и распространяемых данных, на современном этапе развития систем мониторинга и прогнозирования как в целом ЧС, так и, в частности, речных наводнений, существует ряд проблем, препятствующих

широкому использованию этих разработок при решении пользователем прикладных задач [65]:

1. Недостаточная степень автоматизации функционирования. Подавляющее большинство существующих систем доведения мониторинговой информации ориентировано исключительно на человеко-машинный интерфейс и в конечном итоге формирует на веб-странице изображение, содержащее представление требуемых пространственных данных. Очевидно, в этом случае *их дальнейшее использование для автоматизированного решения прикладных задач становится невозможным.*

2. Известны лишь единичные случаи предоставления моделей предметных областей как сервиса для работы с пользовательскими данными. То есть, большинство известных систем *предоставляют доступ к результатам расчётов и у пользователя сервиса нет возможности выполнить новый расчёт с другими исходными данными.*

3. Недостаточная приспособленность к работе с пользователями – управленцами. Большинство интерфейсов систем прогнозирования ЧС перенасыщены элементами управления, ограничены сложными иерархическими каталогами данных и функций, требуют специальной подготовки лиц, принимающих решения (ЛПР), и т.д., что значительно снижает оперативность оценки обстановки и принятия решений со стороны ЛПР. Кроме того, далеко не во всех системах реализован доступ к данным не только со стационарных компьютеров, но и с мобильных устройств, хотя этот фактор также играет важную роль для оперативного анализа результатов прогнозирования ЧС.

4. Зачастую первичные исходные данные, на основе которых формировались предоставляемые системой мониторинговые данные, имеют большое значение для конечного пользователя. Сюда можно отнести показания всевозможных датчиков, результаты измерений различных параметров сложных ППТО. *В большинстве существующих систем мониторинга эти данные не предоставляются.*

5. Важным вопросом является контроль доступа к наборам мониторинговых данных. Каждая упомянутая выше система использует собственный механизм разграничения доступа и способ аутентификации. В связи с этим отсутствует возможность использовать технологию единого входа (Single Sign-On), когда пользователь переходит из одного раздела портала в другой без повторной аутентификации. Этот вопрос имеет особую важность в случае, если пользователю необходимо автоматически регулярно получать данные из нескольких сервисов мониторинга.

6. Несмотря на появление единичных случаев разработки современных высокотехнологичных геосервисов с соблюдением стандартов веб-картографии и использованием подходов разделения данных и их представления, *большинство существующих порталов-поставщиков мониторинговых данных на данный момент не ориентированы на работу в качестве составных частей (функциональных модулей) в информационных системах конечных потребителей.*

7. Говоря конкретно о космическом мониторинге, проанализированные системы, при всех их положительных аспектах (оперативность, достоверность, доступность), работают, как правило, «по фактам» уже случившихся событий и не направлены на их прогнозирование и предупреждение.

8. Известны успешные попытки внедрения стандартов взаимодействия моделей (в частности, гидрологических и гидродинамических), такие как OpenMI [66]. Однако этот стандарт предоставляет возможность взаимодействия только в рамках одного вычислительного устройства. В условиях использования больших распределённых моделирующих комплексов его применения затруднено. Опубликованные способы преобразования совместного использования стандарта OpenMI с веб-сервисами не получили практического применения.

9. Как правило, проанализированные системы архитектурно построены как локализованные монолитные решения, кроме того, они используют одну конкретную модель (каждая система - свою) для соответствующего этапа моделирования. Таким образом, в указанных системах вычислительные процессы организованы последовательно-параллельно, зачастую, без адаптации к текущей

ситуации, в частности, без реализации выбора наиболее приемлемого моделирующего сервиса.

В целом, можно сделать вывод, что существующие системы не в полной мере отвечают требованиям к степени автоматизации, оперативности процедур прогнозирования ЧС и точности их результатов вследствие ограничений в части:

- автоматизации полного цикла функционирования систем;
- интегрированного использования разнородных информационных ресурсов и сервисов поставки необходимых исходных данных для функционирования систем ППТО;
- возможностей включения в состав систем расчетно-моделирующих сервисов и организации взаимодействия с ними при решении системами целевых тематических задач;
- удобства использования, визуализации и доведения получаемых данных до ЛПР.

Для преодоления данного несоответствия требуется разработка новых подходов к созданию и автоматизации РСКМ, как комплекса взаимодействующих программных средств, обеспечивающих реализацию требований к степени автоматизации, оперативности и точности прогнозирования состояния ППТО.

### **1.3. Методы и технологии организации взаимодействия компонентов распределенных программных систем**

Как следует из проведенного выше анализа, основными видами программных компонентов, отличающих РСКМ, и согласованное взаимодействие которых необходимо обеспечить при функционировании данных систем, являются расчетно-моделирующие модули и сервисы, а также разнородные информационные ресурсы, которые привлекаются для поставки исходных данных, необходимых для выполнения расчетов и решения тематических задач (мониторинга, прогнозирования, проактивного управления). Организация взаимодействия указанных программных компонентов включает вопросы выбора базовой архитектуры РСКМ, формирования состава модулей и сервисов для

решения системой целевых задач, и интеграции разнородных ИР – поставщиков необходимых данных для моделирования.

В данном параграфе будут проанализированы основные методы и технологии, используемые для решения перечисленных задач, и определены наиболее предпочтительные с точки зрения возможности их использования в РСКМ.

### 1.3.1. Архитектура ПК распределенных систем комплексного моделирования

Для организации взаимодействия программных компонентов РСКМ необходимо обеспечить интеграцию разнородных территориально распределенных информационных ресурсов с максимально возможной степенью автоматизации, удобство применения ПК РСКМ со стороны различных категорий пользователей, а также возможность совершенствования РСКМ и расширения её функциональности за счёт применения передовых информационных технологий [24].

К числу архитектур, позволяющих решить перечисленные задачи относятся следующие: монолитная архитектура; модульная архитектура; компонентная архитектура; клиент-серверная архитектура; сервис-ориентированная архитектура [24, 67].

В связи с тем, что РСКМ должна обеспечивать взаимодействие разнородных территориально распределенных программных компонентов (программных комплексов обработки данных, расчетно-аналитических модулей (сервисов) и т.д.), ключевой задачей становится выбор способа организации их сопряжения через информационно-коммуникационные сети.

Сетевое взаимодействие модулей программного обеспечения, основы которого были заложены в клиент-серверной архитектуре, наиболее полно реализовано в сервис-ориентированной архитектуре (СОА). В СОА воплощен модульный подход к разработке программного обеспечения, использующий распределенные, слабо связанные заменяемые компоненты, которые оснащены стандартизированными интерфейсами для взаимодействия по стандартизированным протоколам, что позволяет создавать сложные

распределенные информационные системы [24, 68]. В СОА обеспечивается слабое зацепление (coupling) модулей (веб-сервисов), т.к. интеграция выполняется на уровне протоколов. Это позволяет логически разделить приложение на модули, физически разделив его по аппаратным средствам [24] (в нашем случае, территориально распределенным серверам).

Одно из главных достоинств СОА, определяющих перспективность ее использования при создании РСКМ, состоит в адаптивности и эластичности, которые основываются на слабой связанности существующих и создаваемых программных компонент. В этом случае отдельные интерфейсы не зависят от используемых аппаратных платформ, операционных систем или языков программирования, используемых для разработки этих приложений, что обеспечивает более эффективное взаимодействие сервисов [69].

Обоснование типа архитектуры для решения целого ряда задач создания прикладных автоматизированных систем мониторинга и обработки разнородных данных выполнено в ряде предшествующих исследований (в том числе – в работах, выполненных при участии автора диссертации) [24, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76]. В работах [77, 78] описана формализованная процедура выбора СОА, основанная на сравнительном анализе различных архитектур по показателям производительности, модульности, допустимой гетерогенности, реализуемости многопользовательского режима, масштабируемости. Количественно показано, что для распределенных систем класса РСКМ использование СОА наиболее предпочтительно. Вопросы построения систем мониторинга и создания тематических сервисов для ППТО является уже достаточно проработанным, в том числе в работах с участием автора данного исследования [3, 4, 22, 26, 27, 28, 29, 65, 70, 72, 73, 74, 75, 79, 80, 81, 82, 83]. Типовой пример структуры системы мониторинга ППТО на основе СОА показан на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Структурная схема системы мониторинга ППТО

Однако применение СОА для создания РСКМ требует решения ряда новых задач, в том числе организации сервис-ориентированного взаимодействия, а также интеграции разнородных информационных ресурсов для реализации полностью автоматического цикла функционирования системы.

### 1.3.2. Технологии сервис-ориентированного взаимодействия в ПК РСКМ

Вопросами, которые требуют рассмотрения при организации сервис-ориентированного взаимодействия, являются, прежде всего, технология обмена сообщениями между компонентами РСКМ, применение адаптеров и медиаторов сообщений, технологии веб-картографии, способы организации хранения данных, использование реестра сервисов.

#### *Технология обмена сообщениями*

Стандартом де-факто взаимодействия распределённых систем в настоящее время остаётся технология *обмена сообщениями*. Такие реализации, как RabbitMQ, ActiveMQ и другие брокеры сообщений в составе сервисной шины предприятия хорошо себя зарекомендовали при построении асинхронной связи между



сервисами. Однако в последнее время стали популярны технологии *поточковой передачи событий* (например, Apache Kafka), которые также обеспечивают асинхронную связь. Для оценки их применимости для построения РСКМ должны быть приняты во внимание следующие ключевые критерии:

- доступ к истории событий;
- существенная масштабируемость;
- транзакционное поведение (гарантированная доставка).

Для РСКМ на первом месте стоит требование гарантированной доставки сообщения по технологии запрос-ответ. При этом поток данных и количество сервисов-подписчиков для исследуемых в диссертационной работе задач существенно ниже десятков тысяч единиц, на которые рассчитаны типовые системы потоковой передачи событий. Доступ к истории событий может быть использован в перспективе, но для этой цели существуют и другие решения, например, традиционные базы данных. Таким образом, для организации взаимодействия сервисов в разработанной РКСМН целесообразно использовать *технология обмена сообщениями*.

#### *Адаптеры и медиаторы сообщений*

Указанная выше технология обмена сообщениями для интеграции разнородных информационных ресурсов в РСКМ реализует концепцию «интеграции корпоративных приложений» (Enterprise Application Integration, EAI). Она заключается в объединении баз данных и вычислительных процессов, связанных с задачами предприятия, для гарантии согласованного использования информации. Изначально эта концепция разрабатывалась для применения в электронной коммерции, банковской сфере и подобных, однако проведённые исследования показали её применимость и для сферы организации распределённого моделирования природно-технологических процессов в гетерогенной информационной среде.

На протяжении многих лет архитекторы интеграционных решений разрабатывали различные способы взаимодействия разнородных систем. Однако

для большинства из этих архитектур обнаруживается сходство построения, что и легло в основу ряда общепринятых стандартов при создании шаблонов интеграции. Полный перечень шаблонов опубликован в [84], далее приведены шаблоны, используемые при создании предлагаемой РСКМ:

- шаблоны системы сообщений (фильтры, маршрутизаторы, трансляторы);
- шаблоны каналов сообщений (точка-точка, издатель-подписчик, гарантированная доставка, адаптеры, шина сообщений);
- шаблоны формирования сообщений (событийные сообщения, запрос-ответ, корреляционный идентификатор);
- шаблоны маршрутизации (на основе содержимого сообщений, динамические маршруты, разделитель, агрегатор, композитные сообщения);
- шаблоны трансформации (конверт, усложнение содержимого, фильтрация содержимого, нормализация).

Для того, чтобы использовать перечисленные технологии, необходимо на первом шаге составить перечень источников и приёмников данных и их форматов. В РСКМ источниками данных являются различные государственные и частные службы, информационные порталы, почтовые рассылки и т.д. Информация зачастую предназначена для человека и не подходит для автоматического извлечения. Решение этой проблемы заключается в использовании специальных программных адаптеров.

Адаптер канала может получать доступ к API или данным приложения и публиковать сообщения в канале на основе этих данных, а также может получать сообщения и вызывать функции внутри приложения. Адаптер действует как клиент для системы обмена сообщениями и вызывает функции приложений через интерфейс, предоставляемый приложением. Таким образом, любое приложение может подключиться к системе обмена сообщениями и интегрироваться с другими приложениями, если у него есть соответствующий адаптер канала.

При использовании разнообразных датчиков, построенных по принципу интернета вещей (IoT) [85], технология применения адаптеров может охватывать

нулевой и первый уровень модели интеграции данных, приведённой ниже в данном параграфе.

Программно адаптер может быть как тривиальным в случае подключения, например, к источнику данных, предоставляющему программный интерфейс (API), так и многоэтапным, если необходимо проводить разбор (парсинг) веб-страницы в поисках требуемых данных. Наиболее сложный вариант реализованного при построении РСКМ адаптера, применяемого для оперативной загрузки (каталогизации) мониторинговых данных, в том числе данных ДЗЗ, приведён в главе 3. В результате применения группы адаптеров становится возможным обмен унифицированными сообщениями внутри системы (сервисной шины). Это позволяет использовать все остальные типы перечисленных выше шаблонов.

Следует отметить, что использование программного адаптера может быть расширено до трансформации разнородных неструктурированных и слабо структурированных данных в семантические данные (Semantic Web). То есть, как РСКМ, так и внешние системы могут потреблять данные без строгой привязки к их исходному формату. Созданные метаданные позволяют автоматически выбирать данные из общего массива, работать в условиях неполноты информации, замещать данные из одного источника другими, подходящими для решения задачи.

Имея систему упорядоченных входных данных, преобразованных в вид унифицированных сообщений, появляется возможность использования технологии преобразования и маршрутизации этих сообщений посредством технологии медиаторов.

Медиатор – это базовый блок обработки сообщений. Медиатор может принять сообщение, выполнить с ним некоторые predetermined действия и вывести измененное сообщение. Например, медиатор *Clone* разбивает сообщение на несколько клонов, а медиатор *Aggregate* собирает и объединяет ответы перед их отправкой обратно клиенту.

Одна из главных функций медиаторов – сопоставление несовместимых протоколов, форматов данных и шаблонов взаимодействия между различными ресурсами. Данные могут быть разделены, дублированы, агрегированы и

дополнены, что позволяет взаимодействовать сервисам с различными возможностями. Технологическая основа преобразования – применение языков преобразования документов XQuery и XSLT, а для маршрутизации на основе содержимого используется фильтрация XPath.

Медиаторы могут объединяться в последовательности для выполнения многошаговой обработки сообщений. Такая особенность предоставляет весьма широкие возможности реализации сложной логики работы приложения без необходимости написания программного кода.

Технология адаптеров и медиаторов является обязательным элементом для интеграции данных в РСКМ, а также основой для предлагаемого дополнительного уровня абстракции данных, описанного в этой главе ниже.

### *Веб-картография*

При решении различных задач моделирования ПШТО возникает потребность не только в оперативных данных от многочисленных датчиков, но и в сведениях о территории, примеры которых могут быть адресные планы, объекты инфраструктуры, электролинии, трубо- и газопроводы, прочие коммуникации, состав леса, половозрастной состав населения и многое другое. Подобные сведения хранятся в информационных системах администраций муниципальных образований, государственных комитетов, эксплуатирующих организаций. Использование указанных сведений позволяет организовать функционирование ПК РСКМ на более высоком качественном уровне, принимать решения более оперативно и обосновано. К сожалению, до настоящего времени известны лишь одиночные случаи реализации доступа к подобной информации с использованием стандартов веб-картографии.

Первым шагом на пути к интеграции подсистем и сервисов доведения информации является обязательное использование стандартов веб-картографии всеми задействованными поставщиками мониторинговых данных.

К настоящему времени наибольшее признание получили стандарты, разработанные международной некоммерческой организацией Open Geospatial

Consortium (OGC), объединяющей более 500 компаний, правительственных учреждений, научно-исследовательских организаций и университетов [86, 87].

Подавляющее большинство функционирующих сейчас систем доведения пространственных данных до потребителя используют следующие спецификации OGC: Web Map Service (WMS), Web Feature Service (WFS). Кроме того, необходимо использовать дополнительные возможности, предоставляемые многими геоинформационными серверными решениями типа Web Coverage Service (WCS), обеспечивающего представление данных в каждой измеряемой точке пространства и их интерпретацию данных на клиентской части приложения.

Указанные стандарты нацелены на предоставление и простейшую модификацию пространственных данных. Помимо этого, поставщики мониторинговых данных могут предоставлять более сложные геосервисы по обработке исходных данных. Их интеграция становится возможной благодаря наличию стандарта WPS (веб-сервис геопроессинга), который описывает правила для входящих и исходящих данных (запросов и ответов на них) для сервисов геопроессинга (геообработки).

Для организации доступа к остальным сервисам, результатом работы которых не является геопространственная информация, как уже указывалось, следует использовать сервис-ориентированную архитектуру построения информационной системы, позволяющую преобразовать массу частных программных интерфейсов поставщиков данных и сервисов к единому стандартному виду.

Среди свободно распространяемого программного обеспечения наиболее известными и устойчивыми решениями, поддерживающими перечисленные спецификации, являются серверные приложения MapServer и GeoServer. Оба решения хорошо себя зарекомендовали в ходе многолетнего использования в десятках миллионов геопорталов. В отличие от MapServer, GeoServer реализует спецификацию WFS-T (WFS-Transaction), обеспечивающую редактирование полученных данных и их автоматическое обновление на сервере.

Опубликованные результаты сравнительных тестов производительности MapServer и GeoServer указывают на явное преимущество использования GeoServer в условиях, приближенных к предполагаемым условиям работы разрабатываемого прототипа программного комплекса [88].

При использовании данных ДЗЗ, в частности, материалов спутниковой съемки, в качестве одного из компонентов интегрируемых информационных ресурсов, возникает ряд особых требований к программной реализации РСКМ. Размер спутниковых снимков может достигать десятков гигабайт. Обработка подобных изображений на картографическом веб-сервере является ресурсоемкой операцией, которая может быть оптимизирована с помощью различных методик.










Можно выделить три основных алгоритма размещения растровых данных [89]:

1. Server dynamic tiling – на сервер публикуется исходный растр, по запросу приложения клиента генерируются тайлы в требуемой проекции и передаются по протоколу WMS.

2. Server static tiling – на сервер публикуется исходный растр и запускается процесс генерации тайлов для определенных проекций, по окончании процесса, при запросе приложения-клиента, тайлы передаются по протоколу WMS.

3. Использование готовых пирамид – тайлы подготавливаются оператором на рабочем компьютере для определенной проекции. На сервер публикуется готовая пирамида. По запросу приложения-клиента тайлы передаются по протоколу WMS.

Достоинства и недостатки перечисленных алгоритмов схематично представлены на рисунке 1.3 [89, 90].

Ресурс	Server dynamic tiling	Server static tiling	Использование готовых пирамид
Центральный процессор			
Оперативная память			
Хранение данных			



 - высокая нагрузка,  - низкая нагрузка

Рисунок 1.3 – Варианты распределения нагрузки на инфраструктуру

Таким образом, при заданных требованиях к предоставлению доступа к ДДЗЗ (интенсивность обновления данных, аппаратные возможности сервера и условия взаимодействия с клиентской частью) возможно найти такой способ их размещения, который обеспечивает наименьшие затраты на содержание серверной инфраструктуры.

Переход от частных решений к стандартам веб-картографии и веб-сервисам предоставляет дополнительные возможности поставщикам данных, при том, что существующие информационные ресурсы и соответствующие геопорталы могут продолжать существовать в привычном для пользователя виде. Так, возможно появление поставщиков агрегированной мониторинговой информации без необходимости переносить какие-либо архивы с данными, так как вся информация будет предоставляться в режиме онлайн. С точки зрения конечного пользователя доступ к мониторинговым данным будет выполняться в режиме «одного окна», независимо от фактического расположения предоставляемых разнородных данных.

### *Битемпоральное хранилище данных*

Для повышения модульности и гибкости РСКМ следует размещать имеющиеся и создаваемые пространственные данные в независимой реляционной

СУБД с расширениями для работы с географическими объектами. Наиболее известным из свободно распространяемых приложений является СУБД PostgreSQL с расширением PostGIS.

Эффективным решением проблемы хранения данных для РСКМ является применение битемпоральной базы данных, базирующейся на темпоральной модели данных (ТМД). ТМД обеспечивает хранение сведений о жизненном цикле данных (исходных и результатов модельных расчётов). Благодаря битемпоральности используемой ТМД, сохраняется не только время актуальности конкретных данных, но и транзакционное время, т.е. момент их записи в хранилище [91]. Эта особенность упрощает поиск данных, согласованных по времени. Используемая битемпоральная БД позволяет системе функционировать в оперативном и сценарном режимах, а также выполнять моделирование «по прошлому» [12].

### *Реестр сервисов*

Решение задачи интеграции информационных ресурсов при создании РСКМ и соответствующий переход от массы частных интерфейсов к единому, требует упорядочения работы с веб-сервисами, реализующими расчетные и другие модули системы. Технологической основой реализации комплексного моделирования является реестр сервисов, формально описывающий множество потенциально применимых расчетно-моделирующих модулей, осуществляющих моделирование ППТО.

Наличие реестра сервисов обеспечивает возможность реализации механизма автоматического выбора того или иного сервиса из множества альтернатив и назначение его в качестве исполнителя заданной расчётной процедуры. Разумеется, такой режим работы возможен только при наличии согласования альтернативных сервисов по составу и форматам входных и выходных данных, что вполне может быть реализовано комбинацией описанных выше программных адаптеров и медиаторов.

Для реализации указанного подхода необходимо опубликовать в реестре формализованные описания (метаданные) веб-сервиса. Реестр должен содержать



по каждому сервису информацию, с помощью которой можно в автоматическом режиме получить сведения о точке доступа к сервису и параметрах его запуска.

Подавляющее большинство применяемых в настоящее время реестров сервисов представляют собой частные программные реализации, то есть, используются только внутри информационной системы организации и не поддерживают стандарт реестра UDDI. Тем не менее реестры сервисов концептуально удобны и предлагают высокий уровень автоматизации взаимодействия организаций.

Для целей РСКМ использование реестра сервисов обосновано необходимостью автоматического выбора подходящей модели из полимодельного комплекса. При этом никаких требований к глобальной унификации описания сервисов не предъявляется, публикация сервисов для внешнего доступа не планируется. Поэтому в рамках данной работы может быть использована любая программная реализация реестра, позволяющая дополнять техническое описание сервисов собственными параметрами.

### 1.3.3. Методы и модели интеграции разнородных информационных ресурсов

К информационным ресурсам, определяющим гетерогенность информационной среды при функционировании РСКМ, относятся разнородные данные различных поставщиков (сервисов), в том числе такие как:

- сведения об анализируемой территории (ландшафт, карта высот, свойства почвы, наличие растительности и др.);
- результаты измерений параметров ППТО, поступающих от наземных и аэрокосмических данных (характеристики поверхности земли, атмосферы, растительности, водных объектов; пространственные характеристики объектов, результаты измерений от датчиков различной физической природы, и др.)
- данные о составе населения, населенных пунктов и об инфраструктуре в потенциально опасных районах при анализе ЧС;
- информация о параметрах окружающей среды (температура, влажность, направление и скорость ветра, наличие осадков, и т.д.).

Требования к составу и объемам исходных данных не являются фиксированными, они определяются также типом тематических задач моделирования (оперативные, долгосрочные, и др.), наличием базовых и оперативных данных из дополнительных источников, позволяющих уточнять наземную и спутниковую информацию и принимать управленческие решения в режиме реального времени, и т.д.

В общем случае в качестве источников данных могут выступать различные территориально распределенные информационные ресурсы, причем понятие информационный ресурс (ИР) рассматривается в широком смысле как совокупность данных, организованных для эффективного получения достоверной информации – в нашем случае, информации, необходимой для анализа и прогнозирования развития ситуации на территории, в том числе при ЧС. К ИР будем также относить электронные базы данных, содержащие информацию о текущих и прогнозных значения параметров среды и наблюдаемых объектов, сайты с необходимой для моделирования информацией, и т.д. В данном контексте термины интеграция данных и интеграция информационных ресурсов будут рассматриваться как синонимы.

При выборе метода интеграции источников данных необходимо учитывать их свойства: используемую модель представления данных, динамичность/статичность, однородность/неоднородность нескольких источников данных (число которых может быть постоянным или переменным) при использовании различных уровней интеграции [92].

Для создания и функционирования РСКМ существенным является определение базовых подходов к интеграции данных, в том числе таких понятий, как (1) метод интеграции данных, (2) уровень интеграции, (3) способ интеграции, (4) модель интеграции данных. Причем формирование технологий интеграции данных для РСКМ должно учитывать основные возникающие проблемы, определяемые спецификой решаемых системой задач, а именно: (1) проблемы разнородности источников данных с различными моделями данных; (2) проблемы автономности источников данных, которые в общем случае спроектированы под

решение различных конкретных задач разными методами; (3) проблемы распределенности, т.к. интегрируемые информационные ресурсы могут быть доступны зачастую только через протоколы удаленного доступа, в том числе - могут быть распределены в сети Интернет. Названные проблемы оказывают наибольшее влияние на выбор базовых подходов к интеграции данных.

### Методы интеграции данных

К числу основных методов интеграции данных относятся следующие: консолидация, федерализация и распространение (рисунок 1.4) [93].

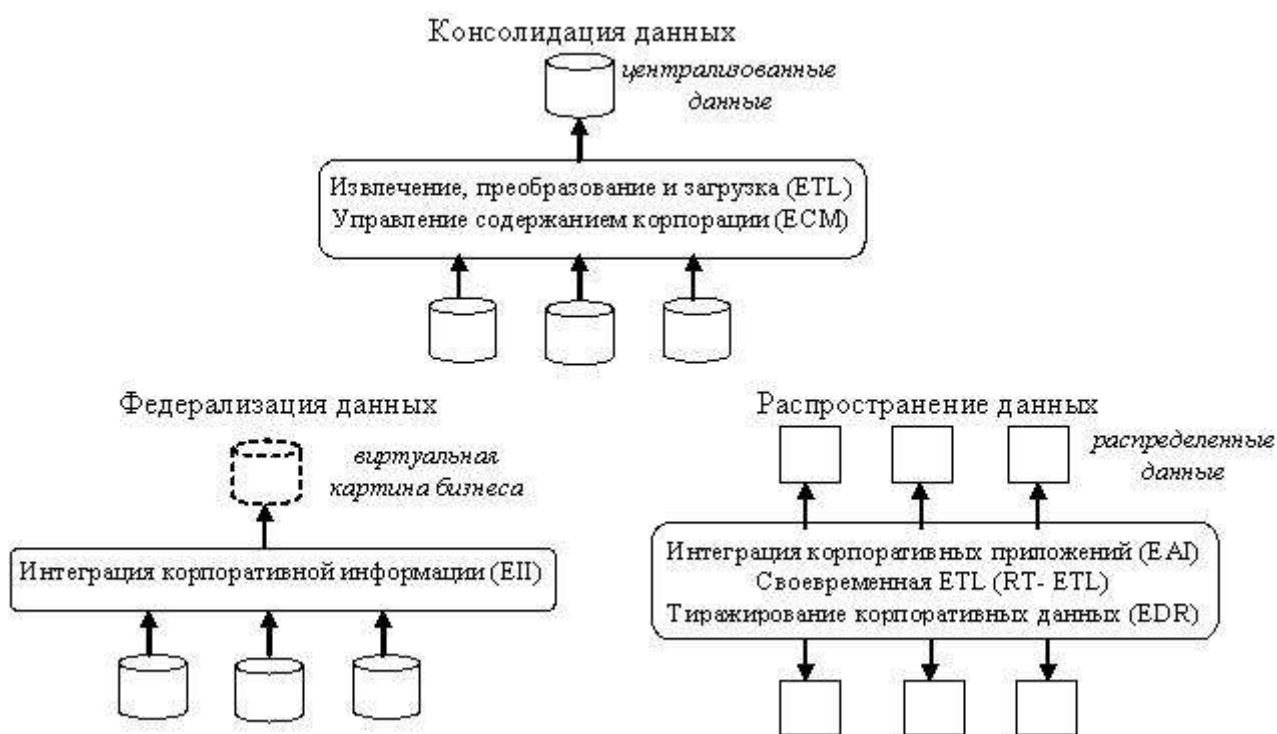


Рисунок 1.4 – Методы интеграции данных [93]

Консолидация подразумевает сбор данных из нескольких первичных систем и их интеграцию в определенное хранилище; технологически данные интегрируются в основном в системах категории ETL (Extract-Transformation-Load), позволяющих извлекать данные (data extraction) из выбранного источника, менять их структуру/формат (data transformation) с целью применения в бизнес-приложении и отправлять приложению (data load) [93].

Метод консолидации подходит для подготовки отчетности и проведения анализа, но его применение в РСКМ ограничивает возможности проведения

оперативного сбора данных от территориально распределенных источников для их загрузки в расчетно-прогнозирующие модели.

Альтернативой ETL технологиям, имеющим ограниченные возможности для использования в распределенных системах, подобных РСКМ, являются технологии, которые основаны на принципах федеративного объединения данных. Применяемые при этом технологии обозначают термином интеграция информации предприятия (Enterprise Information Integration, EII). Несомненным достоинством федеративного подхода является то, что он дает возможность обеспечения доступа к текущим данным, которые локализованы в месте их получения и обработки, и не требует консолидации первичных данных в новом едином месте хранения [93].

Именно поэтому федеративный подход может рассматриваться как один из базовых для рассматриваемых в диссертации задач интеграции данных, получаемых и обрабатываемых с помощью распределенных информационных ресурсов.

Перемещение данных из одного места в другое выполняется приложениями распространения данных, функционирующими в оперативном режиме и перемещающими данные к местам их назначения, тем самым являясь зависимыми от конкретных событий. Данные в систему назначения доставляются гарантированно вне зависимости от того, синхронно или асинхронно выполняется передача обновлений первичной системы в конечную, что является отличительной особенностью распространения данных. Двусторонний обмен данными между первичными и конечными системами реализован в большей части технологий синхронного распространения данных [94]. Так, к числу технологий, которые обеспечивают распространение данных, относятся интеграция корпоративных приложений (Enterprise application integration, EAI) и тиражирование корпоративных данных (Enterprise data replication, EDR).

Для того, чтобы каждому адаптеру не приходилось преобразовывать данные в форматы других модулей РСКМ, системы EAI должны использовать независимый от приложения формат данных. Такой формат является основой предлагаемого нового слоя абстракции данных. Система EAI обычно также

предоставляет возможность преобразования данных с помощью описанных выше технологий: адаптеры преобразуют информацию из формата приложения в общий формат шины, а затем медиаторы выполняют семантические преобразования.

Исходя из изложенного, в данной диссертации реализация технологии интеграции разнородных информационных ресурсов в РСКМ основывается на концепции «интеграции корпоративных приложений» (ЕАІ), которая разрабатывалась для применения в электронной коммерции, банковской сфере и подобных, однако проведённые исследования показали её применимость и для сферы организации распределённого моделирования ППТО в гетерогенной информационной среде.

### *Уровни интеграции данных*

Известно, что современные системы интеграции данных позволяют интегрировать их на нескольких уровнях:

- физический уровень - интеграция данных подразумевает их конверсию из нескольких источников для физического представления в определенном едином формате;
- логический уровень - к данным из различных источников обеспечивается доступ в терминах единой глобальной схемы для описания их совместного представления данных с учётом их структурных, поведенческих, но не семантических свойств;
- семантический уровень – семантические свойства данных в контексте единой онтологии предметной области учитываются при их совместном представлении [95].

В соответствии с применяемым уровнем интеграции данных, характеристики источников данных могут иметь различную неоднородность, например: использование различных форматов файлов (физический уровень); применение неоднородных моделей или различных схем данных (логический уровень); использование различных онтологий (семантический уровень) – в частности, когда

источники данных как ИР моделируют определенный фрагмент предметной области, имеющей собственную понятийную систему [95].

Представленная ранее концепция интеграции корпоративных приложений по умолчанию предполагает технологии интеграции данных на физическом и логическом уровнях. Однако в данной диссертационной работе предпринята попытка реализовать технологии интеграции на семантическом уровне данных различной физической природы, поступающих из различных информационных ресурсов в новом слое абстракции данных.

### *Модели интеграции данных*

Для формирования нового слоя абстракции данных требуется определить состав моделей интеграции данных. Наиболее широкое использование в системах интеграции нашли реляционная или объектная модели данных. Учитывая активную разработку веб-приложений, сегодня всё чаще используется модель, которая базируется на стандартах XML. Благодаря появлению объектного расширения языка SQL на основе объектно-реляционной модели в 90-х годах, стало возможным использование формы XML-документов для представления схем БД и реляционных данных, а также среды БД SQL для представления информационных ресурсов XML [92, 95]. XML может также быть применен для транспорта сообщений в веб-среде [92, 95], что очень важно учитывать при создании рассматриваемых в диссертации РСМ.

В системах интеграции данных нашли широкое применение официальные международные стандарты и промышленные стандарты де-факто, например, стандарты баз данных ISO/IEC SQL, ISO/IEC SQL/MED, стандарт объектных данных консорциума ODMG, стандарт UML консорциума OMG, стандарты платформы XML консорциума W3C, стандарт Дублинского ядра консорциума OCLC и др.

В подобных системах стандарты используются для того, чтобы определить унифицированную модель данных (метаданных) как основу единого интерфейса для доступа к интегрированным данным для приложений и/или конечных

пользователей. Отдельные стандарты (в частности - XML) дают возможность «погрузить» интегрированные данные в некоторую полезную инфраструктуру и пользоваться для доступа к ним ее функциональностью» [92, 95]. Стандарты Инициативы открытых архивов (Open Archives Initiative, OAI) применялись в интеграции ИР электронных библиотек [92, 95, 96].

Описанные модели данных, однако, никак не учитывают их семантику. Конструктивно интеграция данных на семантическом уровне в настоящее время реализуется посредством технологий, реализованных в семантической паутине (Semantic Web). Основное отличие Semantic Web от обычной Web заключается в использовании метаданных, благодаря которым она становится универсальным носителем для данных, информации и знаний. Применение Semantic Web обеспечивает более осознанное использование данных, способствуя упрощению их поиска, автоматизации их обработки, перераспределения между приложениями и интеграции [97]. В этой связи, вполне естественно воспользоваться преимуществами Semantic Web в информационных системах, подобных РСКМ.

К настоящему времени появились стандарты языков описания онтологий и метаданных (например, JSON-LD, RDF, OWL, SPARQL), а также множество инструментов для работы с онтологиями, таких как редакторы онтологий (например, Protege) и системы логического вывода (например, Pellet, Racer, Joseki) [98].

Наличие данных инструментов определяет возможность создания и расширения функций программных средств, используемых для интеграции разнородных ИР в РСКМ. В этом случае обеспечивается трансформация разнородных неструктурированных и слабо структурированных данных в семантические данные.

Таким образом, при решении задач интеграции информационных ресурсов в РСКМ целесообразно использовать объектную модель данных, основанную на стандартах XML и JSON-LD, прежде всего, из-за удобства автоматического извлечения данных, высокой совместимости (кроссплатформенности) и наличия инструментов формализация описания типов данных. Что касается семантического

уровня, то в РСКМ предлагается применить подход Semantic Web – использование XML документов, XML схем, RDF-описания связей объектов и формата JSON-LD.

#### **1.4. Постановка задачи исследований**

Проведенный анализ существующих распределенных систем моделирования ППТО и методов автоматизации их функционирования показал, что создание соответствующих программных комплексов является сложной многоаспектной задачей, решение которой должно базироваться на разработке научно-методического и программного обеспечения для реализации технологий комплексного моделирования и интеграции разнородных информационных ресурсов. При этом для эффективного применения КМ необходима автоматизация полного рабочего цикла создаваемых систем моделирования. Известные системы и программные комплексы не позволяют решить эту задачу. Исследованные методы и технологии делают возможной автоматизацию выполнения отдельных функций РСКМ и организации взаимодействия их компонентов, однако в целом создание технологий построения и функционирования ПК для реализации методологии комплексного моделирования ППТО является новой научно-технической задачей.

В связи с этим, целью диссертации является автоматизация функционирования систем комплексного моделирования для повышения оперативности и точности решения тематических задач распределёнными программными комплексами с использованием разнородных исходных данных.

В целом, как следует из проведенного анализа, для создания и обеспечения согласованного функционирования компонентов распределенного ПК комплексного моделирования ППТО необходима разработка моделей, алгоритмов и программных средств, позволяющих решить следующие основные группы задач:

1. Обоснование архитектурного построения программного комплекса РСКМ.
2. Оценивание, выбор, организация взаимодействия и обеспечение согласованного функционирования компонентов (модулей, сервисов) ПК для решения РСКМ каждой тематической задачи с требуемым качеством.



3. Интеграция разнородных информационных ресурсов (данных), в том числе данных ДЗЗ, в процессе решения тематических задач (целевого функционирования) РСКМ.

4. Валидация программного комплекса РСКМ для обеспечения непрерывного оценивания его качества и реализации механизмов выбора и настройки сервисов моделирования в процессе функционирования РСКМ.

Как уже отмечалось, отдельные компоненты перечисленных задач рассматривались в работах, предшествующих выполняемому исследованию, однако совместное решение этих задач применительно к созданию программных комплексов РСКМ рассматривается впервые.

Первая из перечисленных задач - обоснование типа архитектуры для решения задач КМ, проанализирована выше в данной главе. Показано, что при создании РСКМ наиболее предпочтительной является сервис-ориентированная архитектура (СОА), обеспечивающая гибкое кроссплатформенное взаимодействие отдельных функциональных модулей системы.

Поэтому *объектом исследования* в данной диссертации являются распределённые системы комплексного моделирования ПШТО на базе сервис-ориентированной архитектуры, функционирующие в гетерогенной информационной среде, а *предметом исследования* – научно-методическое и программное обеспечение автоматизации функционирования распределённых систем комплексного моделирования ПШТО, функционирующих в гетерогенной информационной среде. При этом основное внимание должно быть уделено второй, третьей и четвертой задачам из приведенного выше перечня.

Оценивание, выбор и обеспечение согласованного функционирования компонентов (модулей, сервисов) РСКМ связано с необходимостью формализации описания функциональной структуры РСКМ и последующего решения задачи определения конкретного состава этих компонентов. При этом выбор конкретного состава компонентов РСКМ однозначно определяет ее функциональную структуру.

В соответствии с решаемыми РСКМ задачами, ее функциональная структура в общем случае включает следующие необходимые функциональные подсистемы (рисунок 1.5):

- подсистема получения, ввода и интегрированной обработки исходных (результатов наземных измерений, материалов аэрокосмосъемки, данных краудсорсинга и др.);
- информационно-моделирующая подсистема, включающая комплекс моделей (моделирующих сервисов), а также технологии выбора и адаптации указанных сервисов;
- подсистема визуализации и доступа к результатам моделирования на основе геопортальных решений и веб-технологий [79, 99].



Рисунок 1.5 – Обобщенная функциональная схема РСКМ

Подсистемы включают в свой состав набор функциональных компонентов (программных модулей, сервисов), каждый из которых может иметь несколько вариантов реализации. Базовой структурой, связывающей все подсистемы, является функциональная структура, которая реализует показанный на рисунке 1.5 информационный процесс и входящие в его состав операции.

В случае использования методологии комплексного моделирования и применения СОА состав функциональных модулей РСКМ является недоопределенным. Этот состав, т.е. функциональная структура РСКМ, зависит от типа задачи, характеристик расчетно-вычислительных модулей (сервисов),

анализируемого участка территории, наличия и расположения источников исходных данных, наличия и характеристик информационных ресурсов для размещения средств моделирования и обработки данных, и множества других факторов. Это означает, что задача формирования функциональной структуры РСКМ состоит в выборе конкретного состава компонентов в каждой конкретной ситуации.

В данной работе будем считать, что перечень потенциально применимых в РСКМ расчетно-моделирующих модулей (сервисов) и значения их показателей качества являются заданными. В этом случае для формирования функциональной структуры РСКМ необходима разработка алгоритма и программных средств, обеспечивающих автоматизацию выбора состава функциональных модулей для каждого конкретного этапа решения тематической задачи.

Для формализации задачи формирования функциональной структуры программного комплекса предлагается использовать теоретико-множественный подход и в качестве основных определить следующие множества её элементов и характеристик:

$A = \{A_i, i \in N\}, N = \{1, \dots, n\}$  – 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 потенциально возможных вариантов реализации функциональных компонентов ( $B_j^i$  -  $j$ -й вариант реализации  $i$ -го функционального компонента);

$c_{ij}, i \in N, j \in \{1, \dots, m_i\}$  – стоимость  $j$ -го варианта реализации  $i$ -го функционального компонента;

$t_{ij}, i \in N, j \in \{1, 2, \dots, m_i\}$  – оперативность (длительность работы)  $j$ -го варианта реализации  $i$ -го  $A_i$  функционального компонента;

$p_{ij}, i \in N, j \in \{1, \dots, m_i\}$  – целевой показатель качества работы  $j$ -го варианта реализации  $i$ -го  $A_i$  функционального компонента. В качестве такого показателя используется достоверность, точность моделирования (прогнозирования), или другие показатели, характеризующие степень удовлетворения пользователя

качеством моделирования (прогнозирования) [13]. Для определенности считаем, что этот показатель принимает значение из интервала  $[0, 1]$ .

Вариант функциональной структуры РСКМ при выборе конкретных функциональных компонентов из имеющейся номенклатуры обозначим  $X = \|\|x_{ij}\|\|$ , где  $x_{ij} = 1$ , если в качестве  $A_i$  используется сервис  $B_j^i$ , и  $x_{ij} = 0$ , в противоположном случае.

Перечень целевых функций в рассматриваемой задаче в общем случае определяется типом решаемых РСКМ задач и целями функционирования РСКМ и создаваемого ПК. Учитывая сформулированные выше требования по оперативности и точности моделирования ППТО, а также необходимость оценивания затрат на реализацию этих требований, в задаче выбора целесообразно использовать три группы показателей: затраты на реализацию того или иного варианта функциональной структуры РСКМ, оперативность решения тематической задачи при том или ином составе компонентов, включаемых в функциональную структуру, и целевой показатель, отражающий качество моделирования (прогнозирования) состояния ППТО [6]. Соответственно, для каждого сервиса должны быть заданы длительность цикла расчетов, затраты на функционирование сервиса в случае его использования в цикле расчетов, а также целевой показатель качества моделирования, в частности, точность результатов.

Такой подход к определению показателей позволяет решать задачи организации 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 качества использования РСКМ по функциональному назначению.

Анализируемые показатели могут быть определены следующим образом [6]:  
– затраты на реализацию цикла расчетов по сформированному алгоритму функционирования РСКМ:

$$C(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} c_{ij} \cdot x_{ij} ; \quad (1.1)$$

– показатель оперативности реализации алгоритма функционирования РСКМ (длительность цикла расчетов):

$$T(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} t_{ij} x_{ij}; \quad (1.2)$$

– целевой показатель качества моделирования:

$$P(X) = \min_{i \in N} \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} x_{ij}. \quad (1.3)$$

Учитывая, что на позиции каждого выбираемого элемента функциональной структуры РСКМ может находиться только один компонент, вводятся ограничения следующего вида:

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \leq 1, \forall i \in N. \quad (1.4)$$

Данные ограничения задают область  $\Delta$  допустимых вариантов реализации функциональной структуры РСКМ.

В расчетных соотношениях (1.1), (1.2) учтен тот факт, что выбираемые компоненты программного комплекса участвуют в решении тематических задач последовательно (ниже в главе 3 это будет показано на конкретных примерах). Поэтому временной и стоимостной показатели определяются как сумма времен и стоимостей функционирования компонентов, участвующих в решении задачи. Для целевого показателя такой подход неприменим, и он определяется как минимальное (наихудшее) значение показателя качества решения соответствующего фрагмента целевой задачи среди всех значений данного показателя у участвующих в решении компонентов.

С учетом введенных обозначений задача формирования функциональной структуры РСКМ сводится к многокритериальной задаче выбора на дискретном множестве допустимых альтернатив следующего вида:

$$\min_{X \in \Delta} C(X), \min_{X \in \Delta} T(X), \max_{X \in \Delta} P(X) \quad (1.5)$$

Содержательно данная постановка интерпретируется следующим образом: необходимо определить такой состав компонентов (сервисов, программных модулей), включаемых в РСКМ для решения конкретной задачи моделирования

ППТО, при котором обеспечивается минимизация затрат на функционирование РСКМ, максимизация показателей оперативности и целевого показателя качества функционирования программного комплекса – при имеющейся номенклатуре сервисов с заданными показателями качества.

Сформулированная задача выбора функциональной структуры является одним из ключевых элементов комплекса научно-методического обеспечения, который должен быть создан для достижения цели диссертационной работы.

Кроме того, как показано выше в данной главе, требуют развития и практической реализации подходы к созданию технологических решений, обеспечивающих организацию взаимодействия компонентов ПК РСКМ при его функционировании на базе СОА, в том числе, интегрированное использование разнородных данных для моделирования, интерпретацию результатов моделирования и их доведение до конечных пользователей, а также требует решения задача валидации программного комплекса, в первую очередь, на базе данных ДЗЗ.

Кроме теоретических разработок, для достижения цели диссертации должны быть проведены практические разработки по созданию экспериментального образца программного комплекса РСКМ и экспериментальные исследования по его апробации применительно к конкретным ППТО. Как показал проведенный выше анализ, в качестве примера для эксперимента целесообразно рассматривать одну из наиболее сложных задач в данной области – задачу создания ПК для автоматизации оперативного прогнозирования речных наводнений, как наиболее характерную с точки зрения необходимости выполнения комплексного моделирования и наиболее сложную с позиций организации взаимодействия большой номенклатуры распределенных разнородных информационных ресурсов и сервисов.

В целом, исходя из изложенного, достижение цели исследований требует решения следующих частных задач:

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 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 по разработке алгоритмического и методического обеспечения автоматизации распределенных систем комплексного моделирования, в свою очередь, включает разработку:

- способа алгоритмизации взаимодействия программных средств распределенной системы комплексного моделирования;
- алгоритма формирования и технология реализации функциональной структуры ПО распределенной системы комплексного моделирования при решении тематических задач;
- способа интеграции разнородных данных в системах комплексного моделирования;
- методики валидации программных средств распределенных систем комплексного моделирования речных наводнений на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Анализ задач автоматизации комплексного моделирования ППТО и особенностей построения и функционирования ПК РСКМ выполнен в данной главе. Последующие главы посвящены решению остальных перечисленных задач.

## 1.5. Выводы по разделу 1

1. Наиболее перспективной концепцией для построения систем моделирования ППТО является применение и автоматизация комплексного моделирования сложных объектов, предполагающего использование не одной, а множества моделей ППТО с реализацией механизмов выбора наиболее приемлемых моделей и настройки их параметров в процессе функционирования РСКМ. Проведенный анализ задач комплексного моделирования ППТО показал высокую актуальность исследований по его сквозной автоматизации, и разработке моделей, алгоритмов и программных средств для организации взаимодействия программных компонентов, обеспечивающих функционирование РСКМ в гетерогенной информационной среде, обеспечению расчётов необходимыми исходными данными, включая данные ДЗЗ, а также интерпретации и предоставления результатов пользователям.

2. Выполненный анализ показал, что существующие системы моделирования ППТО, в том числе для условий ЧС, не в полной мере отвечают требованиям к степени автоматизации, оперативности процедур моделирования и точности результатов вследствие ограничений в части:

- автоматизации полного цикла функционирования систем;
- интегрированного использования разнородных информационных ресурсов и сервисов поставки необходимых исходных данных для функционирования систем ППТО;
- возможностей включения в состав систем расчетно-моделирующих сервисов и организации взаимодействия с ними при решении системами целевых тематических задач;
- удобства использования, визуализации и доведения получаемых данных до ЛПР.

Для преодоления данного несоответствия требуется разработка новых научно-методических подходов и программно-технологических решений по созданию ПК РСКМ, обеспечивающих реализацию требований к уровню автоматизации и целевым характеристикам качества функционирования РСКМ.



3. Построение ПК РСКМ целесообразно осуществлять на базе сервис-ориентированной архитектуры. Соответствующий стек технологий должен включать применение обмена сообщениями между компонентами РСКМ, реализацию адаптеров и медиаторов сообщений, технологий веб-картографии, использование битемпоральных баз данных и реестра сервисов. Для интеграции разнородных информационных ресурсов в системе целесообразно использование концепции «интеграции корпоративных приложений» (ЕАІ). При этом необходима разработка принципиально новых подходов к организации взаимодействия программных компонентов РСКМ, учитывающих распределенность рассматриваемых систем, их функционирование в гетерогенной информационной среде, и необходимость решения задач выбора состава моделирующих сервисов в динамически изменяющейся обстановке.

4. Проведенный анализ показал, что цель диссертационных исследований – автоматизация функционирования распределенных систем комплексного моделирования ППТО – может быть достигнута за счет решения следующих частных задач:

- анализ задач автоматизации комплексного моделирования ППТО и особенностей построения и функционирования ПК РСКМ.

- разработка алгоритмического и методического обеспечения для организации взаимодействия программных компонентов и автоматизации функционирования РСКМ с учетом распределенности компонентов, их функционирования в гетерогенной информационной среде, и необходимости решения задач выбора состава моделирующих сервисов в динамически изменяющейся обстановке;

- разработка комплекса программных средств, обеспечивающего автоматизацию функционирования распределенной системы комплексного моделирования;

- проведение экспериментальных исследований по апробации разработанного научно-методического и программного обеспечения автоматизации функционирования распределенной системы комплексного моделирования при решении практических задач.

## **2. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **2.1. Формализация описания функциональной структуры РСКМ на базе нотации BPMN**

Комплексное моделирование, лежащее в основе функционирования рассматриваемых в данной работе РСКМ, технологически реализуется посредством организации согласованного функционирования ряда программных компонентов (модулей, сервисов и утилит), в том числе реализующих модели функционирования ППТО. Многие из необходимых моделей (ПМК) настолько сложны, что их создание при разработке комплексных автоматизированных систем мониторинга и прогнозирования состояния ППТО «с нуля» своими силами с учётом современных стандартов программирования и протоколов взаимодействия становится экономически нецелесообразным. Для построения РСКМ во многих случаях более целесообразно использовать сторонние сервисы и приложения, уже созданные и поддерживаемые той или иной организацией, специализирующейся на их разработке. Примерами таких приложений могут служить сложные гидрологические и гидродинамические модели, модели развития лесных пожаров, модели распространения загрязнений в водной среде и атмосфере, и др. Диапазон вариантов реализации взаимодействия используемых приложений и сервисов весьма широк: от современного хорошо документированного программного интерфейса до устаревшего пользовательского графического интерфейса. В любом случае возникает необходимость приведения всего набора сервисов к единому формату взаимодействия.

В настоящее время наиболее широко распространённым способом взаимодействия программных систем остаётся REST (Representational state transfer). Несмотря на кажущуюся простоту реализации данного способа, REST является по своей сути «концепцией» или «философией», не обеспеченной строгими стандартами и протоколами. Это приводит к необходимости проведения сложного процесса согласования работы технических специалистов, написания подробной технической документации уникального содержания для каждого

сервиса. В конечном итоге применение REST порождает массу ошибок, связанных именно с неправильными ожиданиями или предположениями о том, как работают сервисы сторонних организаций.

Поэтому предполагается, что следующим шагом станет повсеместное применение подходов, основанных на GraphQL [100]. Однако идея создания этого языка запросов не связана с повышением согласованности и формальности взаимодействия систем. GraphQL помогает снизить сетевую нагрузку за счёт указания только необходимого набора возвращаемых данных и облегчения агрегации данных из нескольких источников в одном запросе.

Таким образом, для обеспечения высокого уровня стандартизации и формализации межсистемного взаимодействия в настоящее время целесообразно продолжать использование протокола SOAP и связанного с ним языка описания веб-сервисов и доступа к ним – WSDL. Несомненно, указанные технологии являются весьма сложными и имеют определённую избыточность в описании сервисов. Но эта избыточность обусловлена сложностью РСКМ и компенсируется строгостью соблюдения правил взаимодействия всеми участниками информационного обмена.

Рассмотренные выше технологии, такие как сервис-ориентированная архитектура, обмен сообщениями и сервисная шина являются лишь способами организации взаимодействия сервисов. При этом вопросы организации самого информационного процесса ими не охватываются. Однако в рассматриваемых РСКМ очевидно присутствует явно заданный информационный процесс, состоящий из упорядоченных операций получения, обработки, хранения и передачи информации. Это свойство делает предлагаемую систему *сложной* и отличает от *больших* систем, функционирующих по принципу «запрос-ответ».

Исполнение информационного процесса, определяющее функционирование программного комплекса РСКМ, может быть описано и реализовано как прямым программированием, так и с помощью различных технологий и инструментальных средств исполнения формализованных информационных процессов. Среди таких программных средств автоматизации, потенциально пригодных для реализации

алгоритмов функционирования РСКМ, можно указать AnyLogic, GPSS, BPsim, PowerSim, Simplex, Modul Vision, Triad.Net, CERT, ESimL, Simulab, NetStar, Pilgrim, КОГНИТРОН, МОСТ и т.д. [8, 14, 101]. В активно разрабатываемых сегодня средствах моделирования широко используются интеллектуальные ИТ, а именно - нейронные сети, мультиагентные системы, методы нечеткой логики, технологии эволюционного моделирования и т.п. [8]. Отдельные средства моделирования могут использоваться для анализа различных аспектов функционирования ППТО, в том числе в условиях ЧС, однако их совместное использование при использовании концепции комплексного моделирования затруднено в связи с отсутствием разработанных механизмов согласования моделей на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях [77].

Проблемы согласования моделей на указанных уровнях требуют отдельного рассмотрения и подробно анализируются в новой научной дисциплине – квалиметрии моделей и полимодельных комплексов [13]. В рамках настоящей работы, в соответствии с целями проводимого исследования, наибольший интерес представляет формализация логики взаимодействия отдельных компонентов РСКМ на программном уровне. При этом основной задачей является обеспечение максимальной степени автоматизации этого взаимодействия. С этой точки зрения первоначальной задачей является описание процесса моделирования (процесса функционирования РСКМ) на формальном языке, обеспечивающем адекватное отображение реальных процессов взаимодействия компонентов РСКМ. Среди потенциально пригодных для данных целей подходов могут быть выделены следующие:

- сети Петри;
- графоаналитические подходы;
- стандарты IDEF (Integrated DEFinition);
- диаграммы UML;
- стандарт eEPC (Extended Event Driven Process Chain);
- нотация BPMN (Business Process Model and Notation).

Один из наиболее распространённых подходов к описанию процессов моделирования основан на использовании сети Петри. Однако недостатком этого подхода является неполнота выразительных возможностей представления операционной семантики [102], что существенно ограничивает его применение для описания (в том числе, визуального) процессов функционирования РСКМ.

Среди отечественных разработок графоаналитических методов наиболее известен подход «Узел-Функция-Объект» [103]. Он наиболее применим для описания потоков событий, однако его функциональные возможности не распространяются на формализацию динамики процессов функционирования сложных систем, к которым относится РСКМ.

Стандарты группы IDEF [104] преимущественно используются для моделирования информационных процессов, функционального моделирования и документирования технологических процессов, однако и в данном подходе недостаточно развиты средства визуального описания процессов функционирования сложных систем, позволяющие осуществлять простой переход от визуального представления функционирования непосредственно к реализации одновременно создаваемого программного комплекса управления процессом моделирования.

Подход на основе диаграмм UML [105] рекомендуется для описания архитектурных решений программных комплексов, но не рассчитан на описание логики взаимодействия компонентов функциональных структур.

Аналогично, стандарт eEPC хорошо описывает потоки ресурсов и событий, но его возможности ограничены при описании динамики процессов функционирования систем, в состав которых входят разнородные компоненты.

Также как и eEPC, нотация BPMN [106] используется для описания диаграмм бизнес-процессов, но BPMN обладает более широкими возможностями для формального описания взаимодействия компонентов сложных систем и модели распределенных процессов [8, 77, 102].

Именно данные отличия BPMN в наибольшей степени соответствуют особенностям рассматриваемых в диссертации РСКМ, а именно: распределенности

компонентов (отдельных программных модулей, сервисов, приложений, осуществляющих моделирование; сервисов сбора, интегрированной обработки исходных данных из разнородных источников, интерпретации и предоставления результатов пользователям) и их динамичному взаимодействию в процессе функционирования ПК. Описания процессов функционирования РСКМ, выполненные в нотации BPMN, напрямую применимы для КМ ППТО с использованием соответствующих программных сред [8].

Благодаря использованию сервис-ориентированной архитектуры РСКМ и нотации BPMN становится возможным визуальное конструирование алгоритмов работы системы за счет использования языка исполнения бизнес-процессов (Business Process Execution Language, BPEL), который позволяет описать и организовать логику взаимодействия веб-сервисов, в том числе, с использованием визуального редактора [77, 107, 108].

Таким образом, из проведённого анализа следует вывод о том, что наиболее подходящей для описания процессов функционирования РСКМ является технология формального описания бизнес-процессов BPMN и его спецификация BPEL4WS (Business Process Execution Language for Web Services).

Для применения описанного подхода к формализации описания процесса функционирования РСКМ, как уже отмечалось выше, необходимо учитывать, что функционирование РСКМ осуществляется в гетерогенной информационной среде и требует интегрированного использования данных ДЗЗ, результатов наземных измерений, расчётно-аналитических моделей, средств визуализации результатов и др. Для достижения высокого уровня автоматизации требуется организовать функционирование РСКМ с доступом к необходимым данным, сервисам и подсистемам. При этом отдельные программные модули (сервисы) могут быть использованы как автономно, так и комплексированы в различных комбинациях по принципу «конструктора» для решения конкретных задач мониторинга и прогнозирования состояния ППТО.

Наиболее предпочтительным вариантом использования отдельных модулей и сервисов в составе РСКМ является полностью автоматический режим работы.

Суть его представлена на рисунке 2.1 в виде нотации BPMN. Запрос пользователя инициирует сценарий на языке BPEL, который интерпретируется на стороне сервисной шины. По заданному алгоритму происходит автоматический сбор и форматирование требуемых исходных данных, в том числе, из внешних источников, задействуется тематический модуль, формируются отчёты на основе выходных данных модуля (сервиса) и поставляются в пользовательский интерфейс.

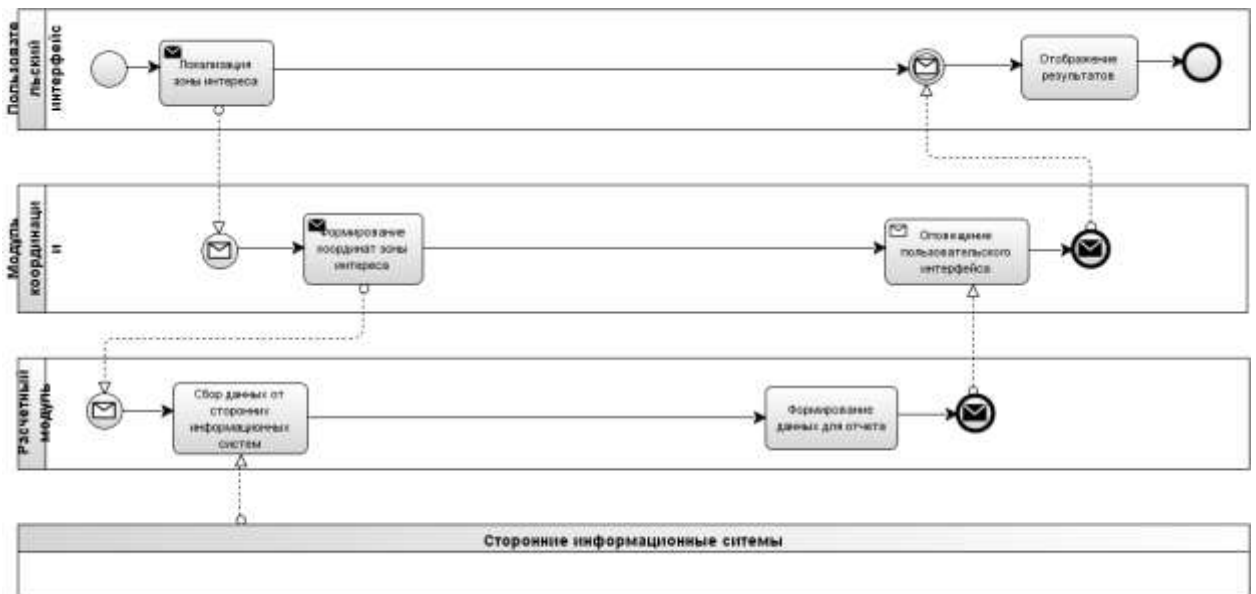


Рисунок 2.1 – Автоматический режим работы РСКМ

В автоматическом режиме могут функционировать тематические модули (сервисы), осуществляющие:

- мониторинг и оперативное прогнозирование изменения состояния ППТО на основе интегрированного использования данных ДЗЗ, результатов измерений параметров ППТО, а также моделирования;
- выявление ППТО, попадающих в зоны поражения в случае ЧС, для организации оповещения, последующего расчета ущерба и планирования аварийно- спасательных и восстановительных мероприятий.

Опыт разработки конкретных вариантов РСКМ показал, что не все тематические модули (сервисы) в настоящее время могут функционировать полностью в автоматическом режиме. Возможны 2 типовые ситуации:

- требуется вмешательство оператора поставщика тематического модуля (автоматизированный режим);
- требуется реакция конечного пользователя для продолжения работы тематического модуля (интерактивный режим).

Вариант автоматизированной работы представлен на рисунке 2.2. В этом случае при автоматическом обращении сервисной шины к тематическому модулю, он, в свою очередь, направляет задание оператору. После того, как оператор выполнит свою часть работы, работа сервиса продолжается в автоматическом режиме вплоть до предоставления конечному пользователю результата работы.

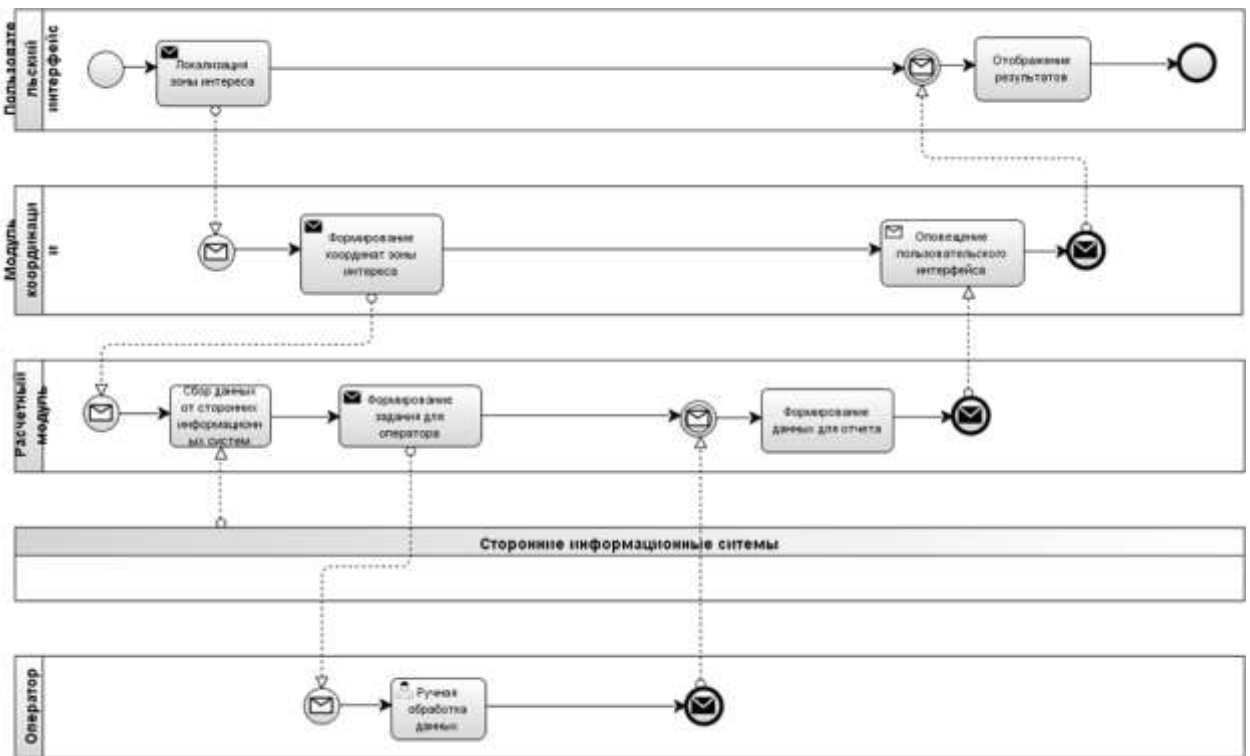


Рисунок 2.2 – Автоматизированный режим работы сервиса с оператором

Интерактивный режим работы тематического модуля в составе РСКМ представлен на рисунке 2.3. Как и в предыдущем варианте, работа сервиса приостанавливается при необходимости ручной работы пользователя. Через сервисную шину отправляется запрос на принятие решения. После того, как конечный пользователь выполнит требуемые действия, работа сервиса продолжается в автоматическом режиме до предоставления конечному пользователю итоговых результатов.



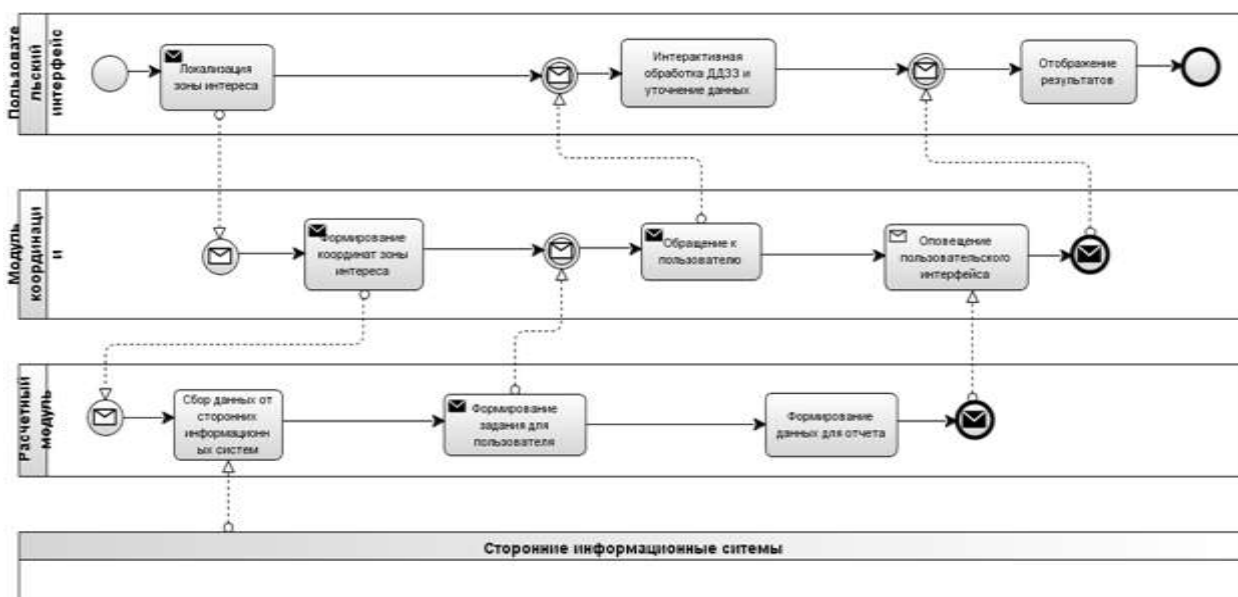


Рисунок 2.3 – Интерактивный режим работы тематических модулей (сервисов) в составе РСКМ

Таким образом, описание алгоритма совместного функционирования модулей РСКМ с использованием технологии BPMN позволяет согласовать взаимодействие участников процесса моделирования и перейти к автоматизации этого взаимодействия под управлением сервисной шины на базе языка BPEL. Предложенный подход является достаточно универсальным для описания практически неограниченной номенклатуры компонентов системы и сервисов при функционировании РСКМ. Построенные схемы функционирования РСКМ в различных режимах позволяют перейти к разработке алгоритма выбора конкретного состава функциональных модулей РСКМ, в том числе, в оперативном режиме.

## 2.2. Алгоритм выбора функциональной структуры программного комплекса РСКМ

Решение сформулированной в главе 1 задачи выбора функциональной структуры ПК РСКМ включает в себя 2 основных этапа [6]:

1. Разработку (выбор, адаптацию) алгоритма нахождения множества  $\Delta^{nd}$  недоминируемых (Парето-оптимальных) вариантов функциональной структуры ПК.

2. Поиск единственного (компромиссного) варианта функциональной структуры.

Множество недоминируемых вариантов функциональной структуры РСКМ может быть определено одним из известных методов [6, 109, 110] и в данной работе подробно не рассматривается.

При определении варианта функциональной структуры ПК РСКМ, в соответствии с постановкой задачи (1.1)-(1.5), необходимо стремиться одновременно к минимизации затрат на функционирование РСКМ, времени на реализацию цикла моделирования, и максимизации целевого показателя качества моделирования. Общепринятым способом разрешения данной неопределенности является поиск компромиссного решения на базе формирования интегрального показателя качества, который учитывает разную размерность частных показателей и различную направленность при их оптимизации. В частности, к числу апробированных и достаточно часто используемых критериев в задачах многокритериальной оптимизации относится минимизация максимальных взвешенных относительных отклонений от оптимумов по частным показателям [111]. В этом случае нахождение компромиссного варианта функциональной структуры ПК РСКМ сводится к решению следующей задачи [6]:

$$X^k = \arg \min_{X \in \Delta} \max_{l \in L} \rho_l w_l(X) \quad (2.1)$$

где:

$L$  – множество частных показателей качества,

$\rho_l$  – весовые коэффициенты относительной важности частных показателей качества, удовлетворяющие условиям  $\rho_l > 0, \sum_{i \in L} \rho_i = 1$ ,

$w_l(u)$  – относительные отклонения от оптимумов показателей качества функционирования на значениях параметров,  $0 \leq w_l \leq 1$ .

Относительные отклонения от оптимумов определяется следующим образом:

$$w_l = \frac{f_l(\bullet) - f_l^0}{f_l^* - f_l^0} \quad (2.2)$$

где  $f_l^0$  и  $f_l^*$  – соответственно наилучшее и наихудшее значения  $l$ -го показателя качества, достигаемые на множестве вариантов решений с учетом ограничений.

Учитывая высокие требования к оперативности выбора конкретного состава сервисов на этапе функционирования РСКМ в условиях ЧС, задачу построения множества  $\Delta^{nd}$  целесообразно решать на предварительном этапе после построения сценария функционирования РСКМ и получения исходных данных по характеристикам сервисов, которые потенциально могут включаться в РСКМ. На этапе функционирования, используя весовые коэффициенты относительной важности частных показателей качества, задаваемые либо автоматически, исходя из внешних условий (например, ограничения на время моделирования, соблюдение баланса точностей при межсистемном взаимодействии), либо ЛПР в процессе интерактивной процедуры, конечное компромиссное решение задачи может быть получено в оперативном режиме, в близком к реальному масштабу времени [6].

Для более наглядной демонстрации предлагаемого подхода рассмотрим решение задачи выбора функциональной структуры РСКМ на примере системы автоматического многомодельного прогнозирования речных наводнений.

За основу возьмём схему, приведённую на рисунке 1.5. Функциональность системы сводится к выполнению трёх этапов: (1) сбор и преобразование измеряемых (первичных) исходных данных, подготовка вычисляемых исходных данных, (2) проведение моделирования наводнения и адаптация моделей, (3) интерпретация и распространение результатов моделирования. Каждый этап состоит из ряда операций, выполняемых компонентами ПК. При этом существует некоторая функциональная избыточность, и одну и ту же операцию можно выполнить с помощью различных сервисов несколькими способами, различающимися по точности, времени выполнения и другим параметрам.

Функциональная структура описанной системы, детализирующая основной информационный процесс, представлена графом на рисунке 2.4.

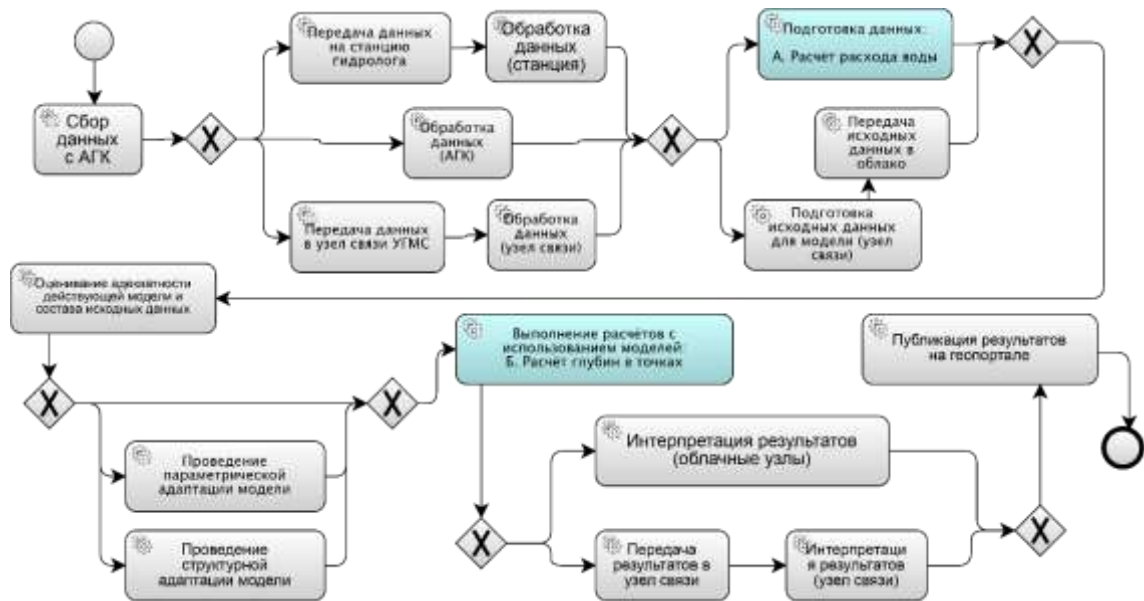


Рисунок 2.4 – Функциональная структура РСКМ для прогнозирования речных наводнений

В вершинах графа (рисунок 2.4) «А. Расчёт расхода воды» и «Б. Расчёт глубин в точках» расположены наименования операций, которые могут быть реализованы с помощью имеющегося множества потенциально доступных сервисов (моделей), т.е. в данном случае  $n = 2$ .

Будем считать, что каждая из операций может быть реализована с помощью одного из трех сервисов, основанных на различных моделях расчетов, т.е.  $m_1 = m_2 = 3$ . При этом возможными и применимыми видами сервисов являются:

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.

Данное предположение соответствует практике проведения расчетов в рассматриваемой предметной области и включает использование наиболее популярных в настоящее время расчетных моделей [12, 17].

Учитывая, что представленный на рисунке 2.4 граф имеет достаточно простую структуру, а также последовательное расположение вершин «А» и «Б», целевой показатель качества моделирования в данной задаче численно равен минимальной из заявленных точностей  $p_{ij}$  результатов применяемого сервиса:

$$P(X) = \min_{i \in N} \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2.3)$$

Показатели затрат на использование сервисов и оперативности рассчитываются на основании соотношений (1.1), (1.2).

Исходные данные по сервисам, используемые при проведении расчетов, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения частных показателей качества сервисов

Сервисы	Значения показателей качества		
	Точность	Стоимость (усл. ед.)	Длительность (сек.)
Сервис А-1	0,8	0,05	60
Сервис А-2	0,6	0,15	10
Сервис А-3	0,9	0,34	5
Сервис Б-1	0,7	1,2	90
Сервис Б-2	0,75	2	70
Сервис Б-3	0,79	3,5	60

Отметим, что в практических задачах исходные данные по качеству функционирования отдельных сервисов формируются двумя путями: предоставляются поставщиками сервисов; рассчитываются и проверяются экспериментально на анализируемом участке территории. Данные операции выполняются заранее. На этапе функционирования ПК значения показателей, в первую очередь, целевого показателя качества моделирования, могут уточняться за счет получения дополнительной информации, например, космических снимков, и сравнения результатов прогнозирования с фактическими границами зон, подверженных наводнениям [12, 17, 112].

Весовые коэффициенты относительной важности частных показателей качества задаются следующим образом:

$\rho_1 = 0,3$  – важность показателя качества моделирования,  $\rho_2 = 0,3$  – важность показателя стоимости моделирования,  $\rho_3 = 0,4$  – важность показателя оперативности реализации алгоритма.

В общем случае значения весовых коэффициентов определяются на основе мнения экспертов и могут изменяться ЛППР в различных режимах работы РСКМ. В рассматриваемом примере эти значения определены, исходя из первоочередной необходимости сокращения сроков выполнения расчетов в реальном (или близком к реальному) масштабе времени в условиях развивающейся ЧС. В случае сценарных расчетов, выполняемых заранее, до начала ЧС, весовые коэффициенты могут задаваться иным образом, и на первый план могут выйти показатель точности моделирования и экономичности расчетов.

Сформированное на первом этапе решения задачи множество Парето-оптимальных решений и соответствующие значения целевых функций представлены в таблицах 2.2-2.3.

Таблица 2.2 – Варианты функциональной структуры РСКМ

Сервисы	Варианты структуры								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сервис А-1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
Сервис А-2	0	1	0	0	1	0	0	1	0
Сервис А-3	1	0	0	1	0	0	1	0	0
Сервис Б-1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Сервис Б-2	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Сервис Б-3	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Таблица 2.3 – Значения показателей качества для вариантов функциональной структуры РСКМ

Показатели	Варианты структуры								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(X)$	0,79	0,6	0,79	0,75	0,6	0,75	0,7	0,6	0,7

$C(X)$ , усл.ед	3,84	3,65	3,55	2,34	2,15	2,05	1,54	1,35	1,25
$T(X)$ , сек	65	70	120	75	80	130	95	100	150

Относительные взвешенные отклонения частных показателей качества от оптимумов (наилучших значений) для каждого возможного варианта функционирования системы показаны в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Относительные взвешенные отклонения от оптимумов

Показатели	Варианты структуры								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho_1 w_1$ (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

В соответствии с (2.1) на завершающем шаге из указанных отклонений выбиралось максимальное среди всех показателей качества для каждого указанного варианта, а затем выполнялся поиск минимального отклонения из всех максимальных.

Максимальное отклонение показателя экономичности в Варианте 4 составляет 0,126, что является минимальным из максимальных отклонений по сравнению с другими вариантами. Выбранному варианту соответствует решение:

$$X = \|0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0\|^T$$

то есть, для операции «Расчёт расхода воды» выбран сервис «Нейросетевой расчёт», а для операции «Расчёт глубин в точках» – сервис «Уравнения Сен-Венана».

В случае, если ЛПР меняет значения весовых коэффициентов важности частных показателей качества, результат решения также меняется. Так, если стоимость расчетов выходит на первый план и весовые коэффициенты определяются как  $\rho_1 = 0,3$ ,  $\rho_2 = 0,4$ ,  $\rho_3 = 0,3$ , то компромиссным будет являться решение:

$$X = \|0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0\|^T,$$

которое соответствует использованию для операции «Расчёт глубин в точках» сервиса «Расчет по модели среза».

Если задача моделирования ЧС решается заранее, в сценарном режиме, главным может выступать целевой показатель качества моделирования, даже в ущерб оперативности. Например, при значениях весовых коэффициентов  $\rho_1 = 0,8$ ,  $\rho_2 = 0,1$ ,  $\rho_3 = 0,1$ , компромиссным является решение:

$$X = \|1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1\|^T,$$

в соответствии с которым для операции «Расчёт расхода воды» выбирается сервис «Табличный расчёт», а для операции «Расчёт глубин в точках» – сервис «Расчет по нейросетевой модели».

Необходимо отметить, что для пользователя РСКМ результат расчетов выдается как в виде компромиссного решения (2.1), так и в виде таблицы недоминируемых решений (пример – таблица 2.3) с тем, чтобы ЛПР мог количественно оценить изменения в значениях частных показателей качества моделирования при переходе от варианта к варианту функциональной структуры РСКМ.

Для автоматизации решения рассматриваемой задачи при большей размерности с множеством операций и сервисов разработан прототип программного модуля на языке Python. В его основе лежит открытая библиотека SciPy. Решение оптимизационных задач выполняется стандартными функциями библиотеки, реализующими симплекс-метод и метод внутренней точки [113].

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет оперативно находить компромиссный вариант функциональной структуры ПК РСКМ, а также дает возможность ЛПР оценить последствия того или иного выбора с точки зрения его влияния на значения всех частных показателей качества. Представленные результаты демонстрируют принципиальную возможность автоматизации задачи выбора функциональной структуры ПК РСКМ как непосредственно при моделировании развивающейся ЧС, так и в сценарном режиме.



### **2.3. Способ интеграции разнородных данных в системах комплексного моделирования**

К ключевым вопросам создания и организации функционирования ПК РСКМ относится разработка технологий взаимодействия ПК с внешними информационными ресурсами и сервисами, являющимися источниками интегрируемых разнородных данных. Наличие подобных механизмов позволяет формировать запросы и получать данные, необходимые для функционирования моделирующих сервисов и решения тематических задач. К таким данным относятся результаты измерений параметров ППТО и внешней среды, материалы космической съемки от КА ДЗЗ, а также другие данные – как пространственные, так и непространственные, используемые при решении задач.

Взаимодействие с внешними системами включает ряд операций: (1) формирование структуры исходных данных, индивидуальных для каждой тематической задачи, (2) выполнение запросов к внешним системам в соответствии со сформированными структурами, (3) получение запрошенных данных, (4) нормализация и группирование полученных исходных данных. Реализация выполнения данных операций осуществляется последовательно на разных уровнях архитектурного построения ПК РСКМ: инициирование запроса осуществляется на уровне постановки тематических задач моделирования, и затем он преобразуется и транслируется последовательно через разные компоненты ПК для передачи во внешние системы. Получение, преобразование, интеграция данных и их использование для решения тематической задачи производится в обратном порядке.

Порядок взаимодействия с внешними системами при запросе и получении данных показан на рисунке 2.5.

Основное решение, обеспечивающее выполнение интеграции разнородных данных, состоит в создании дополнительного слоя абстракции данных. Он показан красным пунктиром на рисунке 2.5 и позволяет заменить сложные отношения М:М между поставщиками данных и ПК РСКМ на простые соотношения 1:М.

Предлагаемый способ интеграции разнородных данных, кроме реализации данного подхода, включает использование ряда программно-технологических решений, проанализированных в главе 1 и выбранных в качестве наиболее перспективных для организации сервис-ориентированного взаимодействия компонентов РСКМ, в том числе применение:

- концепции интеграции корпоративных приложений (Enterprise application integration, EAI) – в качестве основы информационной архитектуры интеграции данных;
- подхода Semantic Web – для придания данным семантической значимости;
- адаптеров сервисной шины – для доступа к разнородным интерфейсам поставщиков данных;
- медиаторов сервисной шины – для модификации данных;
- модели данных XML – для обмена данными между компонентами РСКМ;
- битемпоральной базы данных – для организации хранения данных.

#### *Слой абстракции данных*

В качестве ключевого элемента способа интеграции разнородных данных в системах комплексного моделирования предлагается использовать некоторую расширяемую структуру данных, описывающую предметную область.

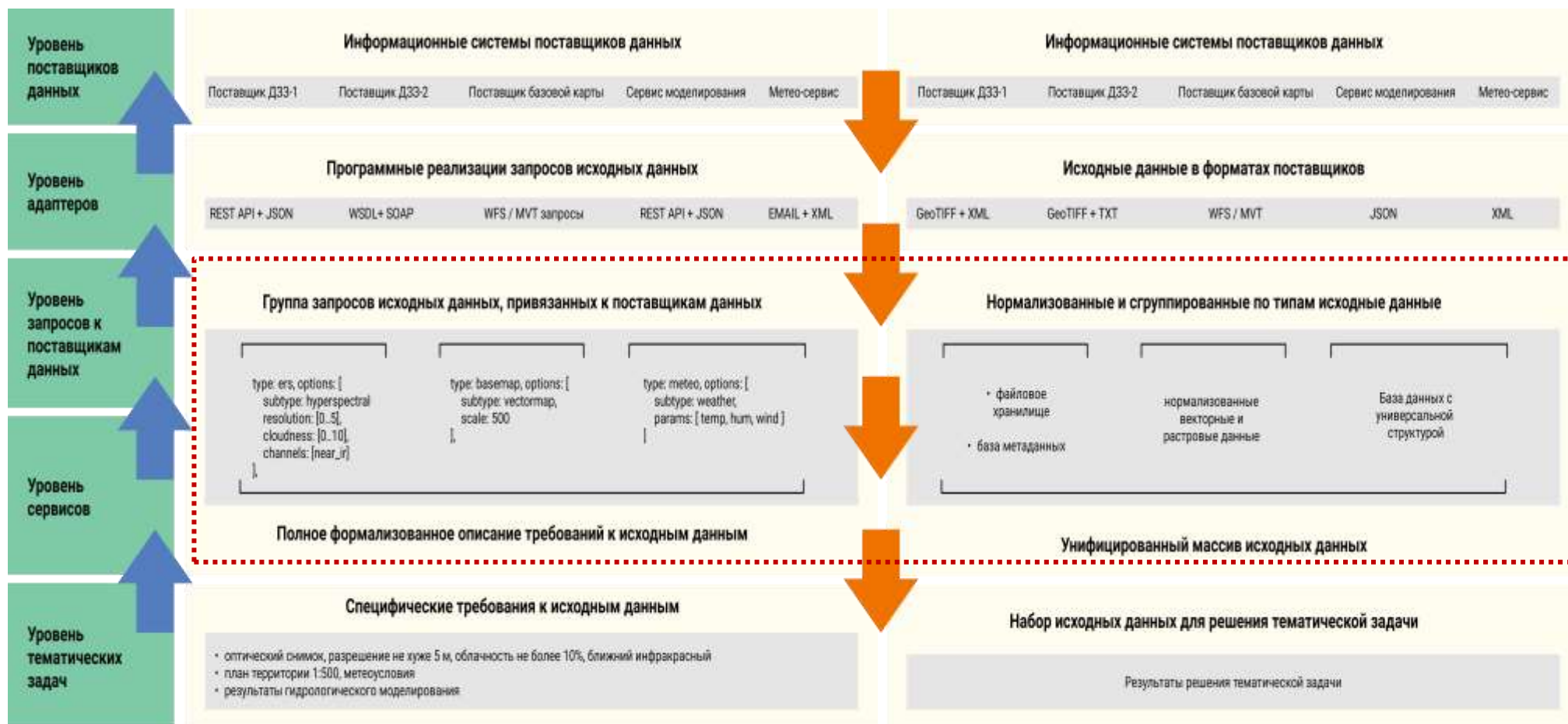


Рисунок 2.5 – Порядок взаимодействия ПК РСКМ с внешними системами при запросе и получении данных

На начальном этапе проектирования слоя абстракции данных необходимо определиться с базовым составом данных, используемых в полимодельном комплексе. Расширяемость, присущая форматам XML и JSON-LD позволяет добавлять в это слой новые данные, не учтённые на начальном этапе проектирования РСКМ.

Например, в задаче комплексного моделирования наводнений такими данными могут быть:

- метеоусловия в заданной точке (температура, влажность, скорость ветра, осадки и прочее);
- значения уровня воды на гидропостах;
- ледовые явления в контрольных точках русла реки (наличие льда, толщина льда, торосы, ледоход и так далее).

Кроме первичных данных, слой абстракции данных может включать некоторые результаты моделирования, например:

- прогнозные данные уровня воды на гидропостах;
- расчётное значение расхода воды на гидропостах;
- прогнозный уровень воды в контрольных точках поймы реки;
- прогнозные скорость и направление течения в расчётных точках.

Для всех данных, участвующих в информационном обмене, подбираются типы данных из справочника Schema.org. Этот справочник представляет собой совместную инициативу по разработке единой схемы для семантической разметки в веб. Инициатива была запущена в 2011 году компаниями Google, Yahoo и Microsoft, а позже и Яндекс. Данная инициатива тесно связана с направлениями Semantic Web, упомянутыми в первой главе.

К моменту написания диссертации в справочнике Schema.org отсутствовали специфические для рассматриваемой предметной области понятия. Поэтому ряд понятий и соответствующих классов был сформирован с помощью механизма расширения Shema.org. Далее приведены некоторые примеры созданных расширений.

Для сущности «гидропост» был разработан тип StreamGauge, являющийся подклассом в иерархии типов: Thing – Place – CivicStructure [114]. Наследование типов позволяет новому типу StreamGauge уже содержать все необходимые свойства для описания его названия, геопозиции, контактные данные обслуживающей организации и т.д.

Далее необходимо было дополнить тип StreamGauge специфическими данными, такими как замер уровня воды в конкретный момент времени. Соответствующее свойство класса StreamGauge было названо waterLevel. В справочнике Schema.org для этого свойства существует подходящий тип данных Observation, являющийся подклассом Thing – Intangible. Причём возможно использовать этот тип данных как для действительно выполненных замеров, так и для прогнозных значений.

Пример предлагаемого семантического описания гидропоста в слое абстракции данных в формате JSON-LD приведён в листинге 2.1.

Листинг 2.1 – Пример предлагаемого семантического описания гидропоста 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"
  }
}
```

Аналогичным способом задаётся описание семантических данных для уровня воды в расчётной точке поймы реки. Разработан тип данных `floodPoint`, включающий свойства `latitude` и `longitude` для определения координат точки и `waterLevel` уже упомянутого типа `Observation`.

Создание всех остальных используемых типов данных выполнялось таким же способом — составлением необходимых свойств заданного типа в класс и определение его места в иерархии документа `Schema.org`. В рамках текущей реализации РСКМ было разработано 7 типов данных:

`WeatherStation` — метеостанция, включающая другие созданные типы данных;

`WindObservation` — расширение типа `Observation` для учёта параметров ветра;

`TemperatureObservation` — измерение температуры;

`HumidityObservation` — измерение влажности воздуха;

`PrecipitationObservation` — измерение уровня и типа осадков;

`IceObservation` — определение наличия ледовых явлений, их типа и измерение параметров;

`EarthRemoteObservation` — дистанционное зондирование Земли, включающий свойства типа `GeoShape` (контур снимка), `Organization` (поставщик данных), `Observation` (дата снимка), `URL` (ссылка на файл снимка).

Применение предложенного подхода позволяет интегрировать данные от различных поставщиков на семантическом уровне. С помощью системы адаптеров и медиаторов каждый частный формат получаемых исходных данных приводится к рассмотренному выше универсальному формату РСКМ, формируя, таким образом, слой абстракции данных. Далее, все применяемые модели из полимодельного комплекса РСКМ снабжаются программными обёртками, которые могут работать с этим слоем абстракции данных и извлекать требуемую информацию. Важным результатом является то, что большое количество разнообразных связей каждой модели с каждым поставщиком данных заменяется простой связью моделей со слоем

абстракции данных, безотносительно того, каким образом эти данные были получены и в каком формате.

Стоит ещё раз отметить, что в полимодельном комплексе РСКМ выходные данные одних моделей могут являться входными данными других моделей. В этой ситуации выходные данные также размещаются в слое абстракции данных и модель-приемник может получить их на вход независимо от того, были ли они измеренными или рассчитанными. На этом принципе также функционирует вспомогательный сервис заполнения пропущенных или ошибочных данных. Если в ходе обращения модели к данным обнаруживается их отсутствие, данные на требуемый момент времени восполняются с помощью статистических функций интерполяции. Этот сервис используется при практической реализации РСКМ и подробно в данной диссертации не рассматривается.

Технологической основой слоя абстракции данных является традиционная реляционная база данных с полями для хранения битемпоральных данных, набор адаптеров и медиаторов сервисной шины, сервис формирования ответов на запросы моделей.

Так, например, если условная гидрологическая модель M1 запрашивает данные по некоторому гидропосту АГК1 на заданный момент времени, то в качестве ответа будет сформирован документ JSON-LD (или RDF/XML), содержащий сведения об этом гидропосте и измеренный уровень воды. Далее модель M1 выполняет расчёт расхода воды в реке по полученному уровню, и результат возвращает обратно в слой абстракции данных. Теперь, если модель M2 сделает аналогичный запрос данных по АГК1, то в ответном сообщении будет присутствовать как значение уровня, так и расхода воды в реке. При этом M2 не знает о существовании M1 и о её форматах взаимодействия. Таким образом, предлагаемый слой абстракции данных делает РСКМ открытой расширяемой системой, не требующей сложных перестроений при добавлении новых источников данных или моделей.

Для того, чтобы организовать представленный порядок взаимодействия и обеспечить максимальную автоматизацию функционирования РСКМ, к внешним системам предъявляются следующие основные требования:

1. Наличие у внешней системы программного интерфейса, то есть, возможности взаимодействия без участия пользователя. В противном случае становится невозможным использование внешней системы в регулярных автоматических процессах решения прикладных задач конечного пользователя. Требования к самому программному интерфейсу сводятся к необходимости использования одного из стандартов, спецификаций или распространённого подхода. Допустимы протоколы HTTP, FTP для получения файлов, подключения к распространённым СУБД, веб-сервисы с описанием WSDL, REST API и другие.

2. Разделение данных и их представления. Данные, встроенные в гипертекстовую разметку на стороне сервера, требуют высокой трудоёмкости для их автоматического извлечения, поэтому требуется строго отделять данные от их внешнего представления пользователю. Основой реализации этого требования может стать соблюдение архитектуры «Модель-Представление-Контроллер» (Model-View-Controller, MVC) или её разновидностей.

3. Использование для передачи текстовых данных общепризнанных форматов XML или JSON. Большинство информационных систем потребителей уже имеют их встроенную поддержку. Применение собственных форматов данных может значительно усложнить взаимодействие систем.

4. Наличие механизмов автоматической аутентификации. Предпочтительно использование механизмов, поддерживающих единый вход (Single Sign-On): стандарт SAML (Security Assertion Markup Language), стандарты WS-Trust и WS-Federation для SOAP/XML-веб сервисов, стандарты OAuth и OpenID Connect.



Соблюдение приведённых базовых требований совместно с реализацией схемы, приведенной на рисунке 2.5, позволит полностью автоматизировать взаимодействие РСКМ с внешними системами и обеспечит внедрение описанного способа интеграции разнородных данных.

#### **2.4. Алгоритм совместного использования оптических и радарных данных ДЗЗ при определении границ зон затоплений**

Одной из основных особенностей задачи организации взаимодействия распределенных компонентов системы комплексного моделирования является гетерогенность информационной среды функционирования создаваемого ПК. Источником этой гетерогенности является разнородность информационных ресурсов и данных, которые необходимо использовать. К числу необходимых исходных данных, помимо результатов наземных измерений, аэрофотосъемки, краудсорсинга и др., относятся материалы ДЗЗ из космоса.

ДДЗЗ рассматриваются как необходимый источник информации при моделировании функционирования ППТО, и, в частности, речных наводнений, когда речь идёт о больших площадях затопления, разнородности объектов в зоне затопления, а также не кратковременном, но достаточно продолжительном периоде развития данного вида ЧС при зачастую высокой динамике.

Каждая из существующих технологий ДЗЗ (таких, как радиолокационная съёмка и съёмка в оптическом диапазоне) имеет свои ограничения использования, а также методы обработки. Для эффективного применения этих данных при моделировании ППТО требуется разработка алгоритма их совместного использования при существующих методах обработки для интеграции в РСКМ. Рассмотрим задачу разработки такого алгоритма на примере выявления затопленных территорий. Стоит отметить, что предлагаемый подход является достаточно общим и может быть реализован и в других задачах КМ ППТО.

При зондировании в оптическом диапазоне водные поверхности (при отсутствии взвесей), как правило, имеют низкие показатели спектральной яркости, поэтому на оптических снимках они представлены как наиболее темные области – именно это свойство используется в основе большинства алгоритмов детектирования водных объектов по оптическим ДДЗЗ. К числу наиболее эффективных способов решения этой задачи в автоматическом режиме относится расчет индексов для оценки интенсивности отраженного излучения в различных спектральных каналах, среди которых чаще всего используются нормализованный разностный водный индекс NDWI (Normalized Difference Water Index) и нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [12, 81, 112].

Однако, несмотря на представленные возможности применения оптического ДЗЗ, получение этих данных может быть сильно затруднено (или вообще невозможно) при наличии плотного облачного покрова.

На космических радиолокационных изображениях гладкие водные поверхности также отображаются контрастно (в сравнении неводными объектами) и имеют вид темных контуров, т.к. в этом случае радарный сигнал распространяется в сторону, противоположную от антенны, и в итоге характеризуется низким значением интенсивности [12, 81, 115, 116].

Такие факторы как ветер, растительность, лёд способствуют увеличению шероховатости водной поверхности и, следовательно, интенсивности отраженного сигнала. Это, в свою очередь, снижает контрастность водных объектов на радиолокационных изображениях и осложняет их детектирование. В условиях городской застройки указанная задача приобретает дополнительную сложность, т.к. здания и сооружения зачастую перекрывают водную поверхность, «зашумляют» её отображение на снимках, формируют зоны радиолокационной тени [81, 117]. Перечисленные лимитирующие факторы требуют выполнения дополнительных этапов обработки радиолокационных изображений (создание масок объектов,

дополнительная фильтрация шума и т.д.). В общем же случае задача выявления водных объектов, как правило, решается с помощью пороговой обработки данных, включающей определение пороговых значений отраженного сигнала для водных объектов и классификацию снимка (разделения пикселей на классы «вода» и «не вода») [81].

Пороговая обработка в автоматическом режиме может базироваться на методах Otsu, Kittler Illingworth и др. [81, 118, 119], а также быть совмещен, например, с текстурным анализом, классификацией на основе нечеткой логики и т.д. [81, 115, 116, 120, 121, 122, 123, 124, 125]. Для выявления затоплений также используется интерферометрическая обработка данных. В этом случае, водные объекты детектируются по характерным для них низким значениям когерентности [126].

На достоверность результатов влияют не только особенности наблюдаемой водной поверхности, но также характеристики исходных данных, особенно – поляризация сигнала, при которой были получены снимки. Наиболее эффективной для решения поставленной задачи является горизонтальная (HH) поляризация, для изучения частично затопленных территорий также используются перекрестные поляризации (HV, VH). Вертикальная (VV) поляризация чаще всего используется для анализа проявляющихся на водной поверхности гидрологических и атмосферных процессов. Совместная обработка данных, полученных сразу в нескольких поляризациях, позволяет выделить объекты местности по характеру обратного рассеяния [81, 115, 116, 127].

Таким образом, выполненный анализ позволил выявить основные ограничения использования оптической и радиолокационной съёмки из космоса при мониторинге затопленных территорий, которые могут быть преодолены за счёт их совместного применения.

На основе результатов проведенного анализа, в качестве основы для разрабатываемого алгоритма используется оригинальный метод обработки данных ДЗЗ, базирующийся на сочетании пороговой обработки радарных

снимков по методу Оцу (Otsu) и вычисления индекса NDWI по данным оптической съёмки с последующим совместным анализом полученных результатов [81, 128, 129]. При этом, расчет индекса NDWI выполняется с использованием зеленого и ближнего инфракрасного спектральных каналов:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (2.4)$$

где GREEN – отраженное излучение в зеленой области спектра, NIR – отраженное излучение в ближней инфракрасной области спектра [81].

Применение метода Otsu обусловлено тем, что он позволяет определить пороговое значение интенсивности сразу для всего снимка без его деления на отдельные фрагменты [118]. В дальнейшем алгоритм может быть усовершенствован за счёт совместного использования методов расчёта как глобальных (для всего снимка), так и локальных (для отдельных фрагментов снимка или конкретных зон интереса) пороговых значений.

Обобщенная схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 2.6 [81].

Апробация разработанного алгоритма выполнена детектирования участков расположенного на слиянии рек Сухона и Юг города Великий Устюг, затопленных ходе наводнения в 2016 и 2018 гг. С этой целью применены данные с отечественных и зарубежных КА: Ресурс-П, Канопус-В, Sentinel-1, Sentinel-2 и RADARSAT-2.

Данные с КА Sentinel-1 (пространственное разрешение 20 м) и Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м), Ресурс-П (пространственное разрешение 3 м) и Канопус-В (пространственное разрешение 12 м) применены для выявления участков, затопленных в апреле-мае 2018 года, а данные с КА RADARSAT-2 (пространственное разрешением 6 м) – для анализа затоплений, произошедших в апреле 2016 года.

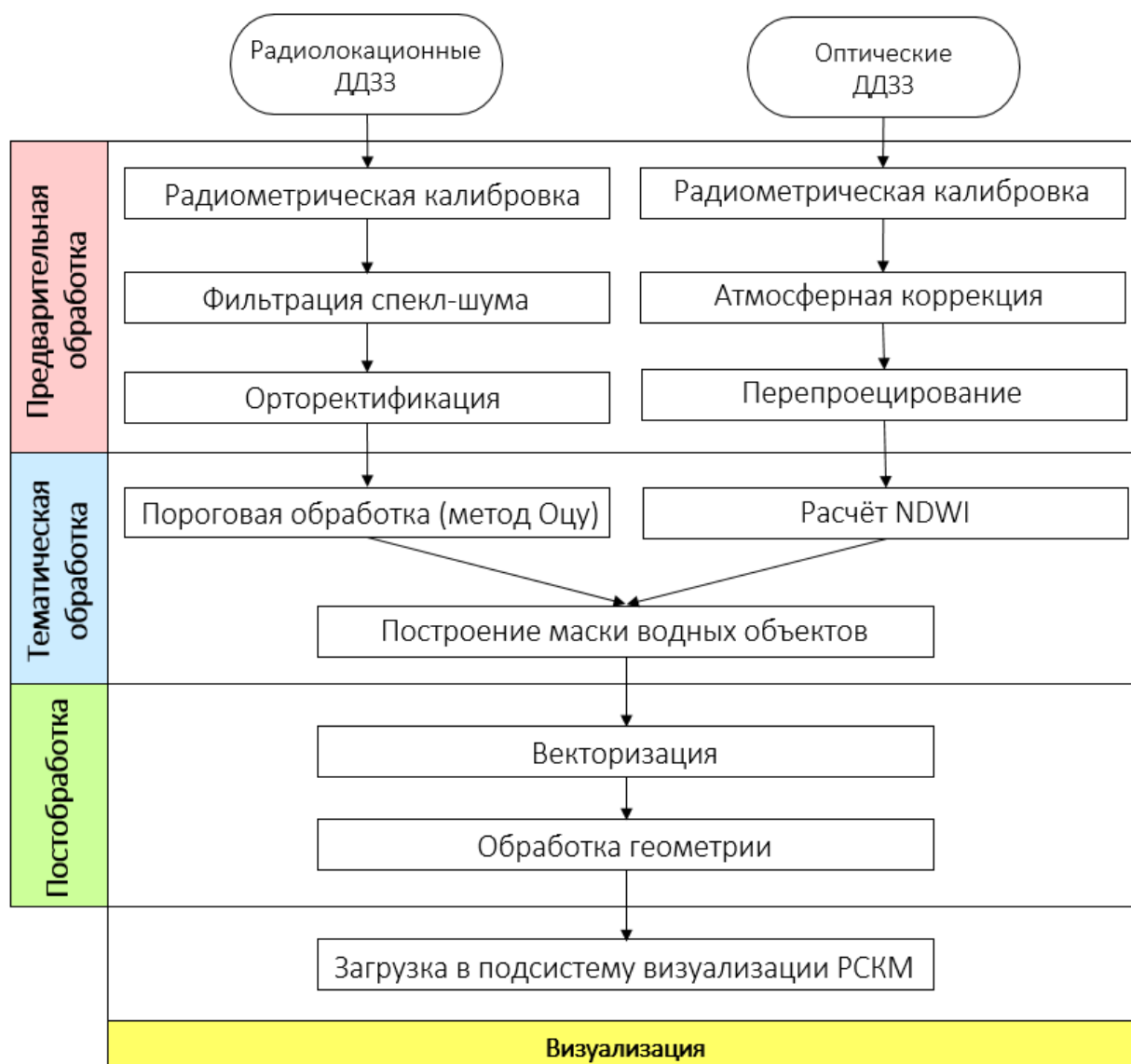


Рисунок 2.6 – Алгоритм совместной обработки оптических и радиолокационных ДДЗ [81]

Для обработки полученных ДДЗ использовано открытое программное обеспечение SNAP и QGIS. В соответствии с предложенным алгоритмом (рисунок 2.6), обработка ДДЗ включает следующие этапы [81]:

1. Радиометрическая калибровка оптических и радиолокационных снимков.
2. Атмосферная коррекция оптических данных; фильтрация спекл-шума на радиолокационных изображениях, вызванного интерференцией волн, отраженных от множества зондируемых объектов и их элементов в пределах пикселя снимка.

3. Определение пороговых значений интенсивности для выявления затоплений на радиолокационных изображениях с использованием метода Оцу; расчёт индекса NDWI по оптическим данным.

4. Построение маски водных объектов на основе совместной обработки результатов выполнения предыдущего этапа.

5. Постобработка векторных данных.

Таким образом, разработанный алгоритм обеспечивает решение задачи выявления затопленных в ходе наводнения территорий в условиях гетерогенности информационной среды, при этом обеспечивая необходимую оперативность и точность за счёт комплексного использования данных различных видов космической съёмки (и с различных КА). Разработанный алгоритм отличается тем, что он позволяет избежать неточностей вследствие наличия облачности и при этом получить данные о затопленных участках на застроенных территориях.

Предложенный алгоритм реализован программно и апробирован в рамках экспериментальных исследований, представленных в главе 4. В рамках функционирования РСКМ (на примере речных наводнений) использование предложенного алгоритма на этапе валидации ПК позволяет автоматизировать этот процесс и последующую адаптацию моделей развития ЧС.

## **2.5. Методика валидации программного комплекса РСКМ на основе данных ДЗЗ**

Одним из сложных и открытых вопросов автоматизации моделирования в сложных распределённых системах остаётся вопрос верификации результатов расчетов и валидации функционирования создаваемых ПК. С точки зрения целей проводимого исследования эти операции необходимы как для оценивания качества функционирования ПК РСКМ, так и для подстройки параметров моделирующих сервисов в случае расхождения результатов моделирования и фактического состояния анализируемой территории, применительно к которой осуществляется моделирование. Алгоритмическое

обеспечение автоматизации процессов валидации является необходимым компонентом модельно-алгоритмического обеспечения функционирования рассматриваемых РСКМ как целостных систем, включающих полный цикл обработки данных, моделирования, интерпретации и предоставления результатов пользователям.

Классическая обратная связь в простой технической системе позволяет непосредственно наблюдать и измерять выходные параметры, сравнивая их с прогнозными. Отклонения от прогнозных значений могут напрямую учитываться в моделях для их калибровки и улучшения характеристик ПК. Иная ситуация складывается в сложных распределённых ППТО. Обратная связь может иметь существенную задержку по времени, быть неточной и даже противоречивой. Эти обстоятельства заставляют искать пути решения проблем автоматизации валидации ПК и адаптации используемых моделей.

В предлагаемой в данной диссертационной работе РСКМ используется целый комплекс сервисов, описывающих функционирование ППТО, в том числе в условиях ЧС. При этом у моделей расчёта зон поражения при развитии ЧС, как правило, присутствуют эмпирические коэффициенты, влияющие на скорость распространения негативного воздействия на территории. Данные коэффициенты ставятся перед определяемыми физическими величинами и вводятся с целью калибровки модели, так как некоторые параметры окружающей среды не представляется возможным точно измерить. Например, в моделях лесных пожаров присутствуют коэффициенты перед значениями параметров влагосодержания лесных горючих материалов [130], а в гидродинамических моделях – коэффициенты шероховатости земной поверхности [10].

Поскольку в общем случае территория распространения ЧС неоднородна, в моделях используются различного рода сетки, матрицы, сектора, домены и т.д., позволяющие устанавливать описанные выше параметры и соответствующие коэффициенты для различных участков территории. Очевидно, что в этом случае корректирующие эмпирические

коэффициенты могут назначаться индивидуально для каждого значения параметра окружающей среды.

При ручной калибровке моделей может использоваться типовой алгоритм подстройки эмпирических параметров: фактическое состояние территории сравнивается с результатами прогноза на один и тот же момент времени. В зависимости от совпадения выходных параметров модели и фактически измеренных значений этих же параметров на местности производится ручная корректировка значений соответствующих коэффициентов. В каждом конкретном случае моделирования способ определения фактических значений параметров среды варьируется.

Рассмотрим пример корректировки параметров гидродинамической модели для РСКМ речных наводнений.

На рисунке 2.7 схематично представлен фрагмент моделируемой ситуации: береговая линия, русло реки и контур затапливаемой территории, полученный в результате работы гидродинамической модели.

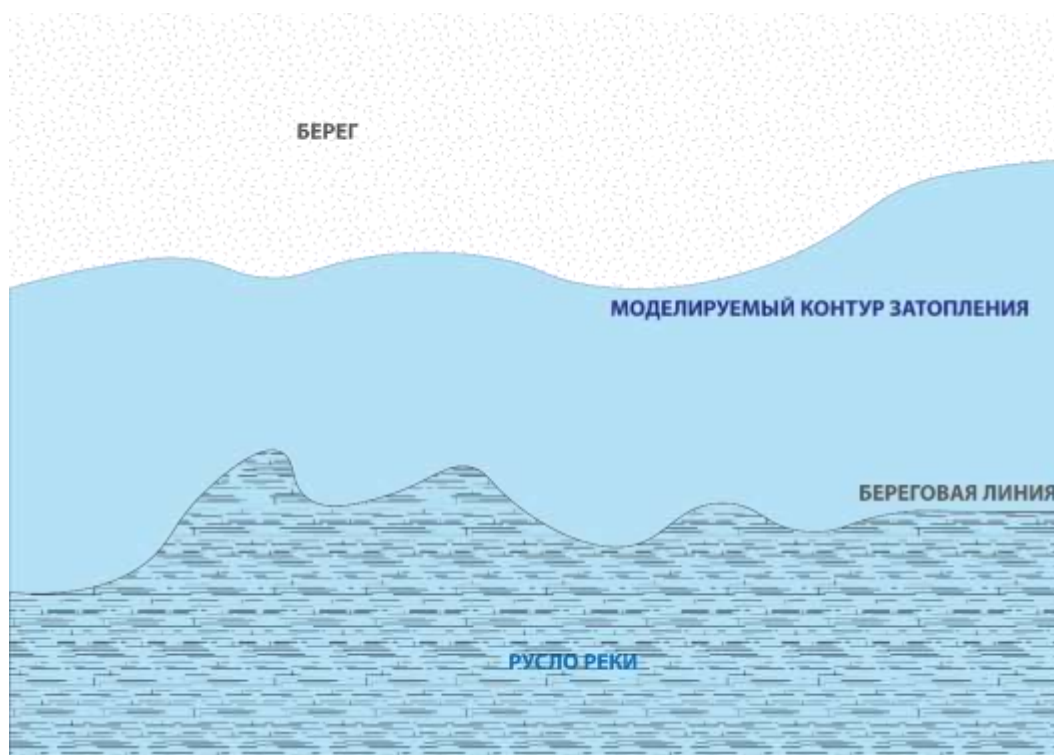


Рисунок 2.7 – Фрагмент моделируемой ситуации речного наводнения

В качестве исходных данных модели используется нерегулярная сетка, в узлах которой задаются индивидуальные параметры среды, основные из



которых – высота над нулевой отметкой уровня реки и коэффициент шероховатости [10, 131]. Этот коэффициент, также называемый коэффициентом Гоклера-Маннинга, является величиной, численно характеризующей сопротивление, оказываемое руслом протекающему потоку, то есть, это интегральная характеристика гидравлических сопротивлений. Он определяется эмпирически, поэтому может использоваться для калибровки и параметрической адаптации гидродинамических моделей. Пример такой нерегулярной сетки для рассматриваемой ситуации приведен на рисунке 2.8.

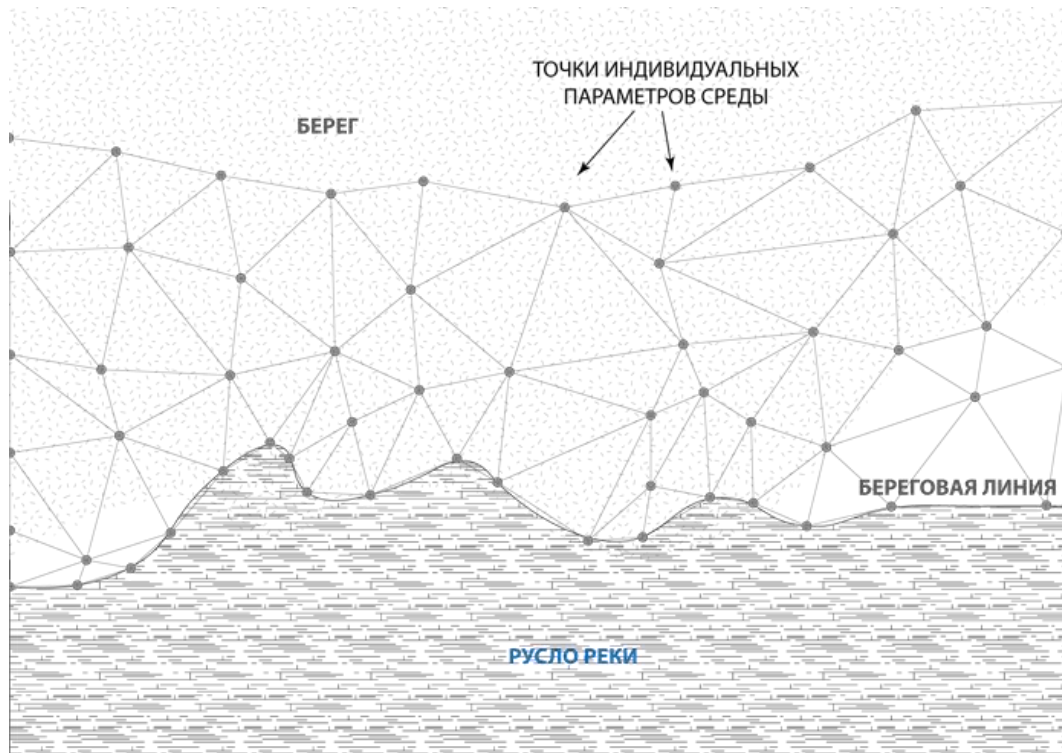


Рисунок 2.8 – Пример нерегулярной сетки для моделируемой ситуации речного наводнения

Для того, чтобы выполнить настройку указанного коэффициента, необходимо провести сравнение полученных результатов моделирования с реальной гидрологической обстановкой на заданный момент времени. В идеальном случае требуется узнать глубину затопления в каждой точке нерегулярной сетки. Но так как сетка может насчитывать тысячи узлов, такие измерения представляются сложно реализуемыми и нецелесообразными. Поэтому на прибрежной территории выбирается ряд точек, по которым фиксируется текущая ситуация.

Полевые измерения могут производиться многими способами. Наиболее полные и точные значения параметров можно получить, используя установленную на территории шкалу с ручным или автоматическим способом получения данных. Но во многих случаях установка множества таких физических шкал на территории сопровождается большими временными и экономическими затратами.

Более простой, но в то же время менее точный способ получения сведений о территории – это данные ДЗЗ. Измерение глубины затопления по этим данным затруднительно, однако, применение методов выявления воды с помощью материалов космической съемки позволяет автоматически определить, какие из контрольных точек фактически затоплены, а какие нет. Выявление реальных границ водной поверхности может быть проведено на базе предложенного выше в данной главе алгоритма совместного использования оптических и радарных данных ДЗЗ.

На рисунке 2.9 приведён пример нескольких контрольных точек. Будем считать, что красным цветом отмечены точки, в которых, судя по данным ДЗЗ, присутствует вода, а зелёным – точки, в которых вода не обнаружена. Очевидно, как и в реальных ситуациях, состояние некоторых контрольных точек не совпадает с моделируемыми значениями.

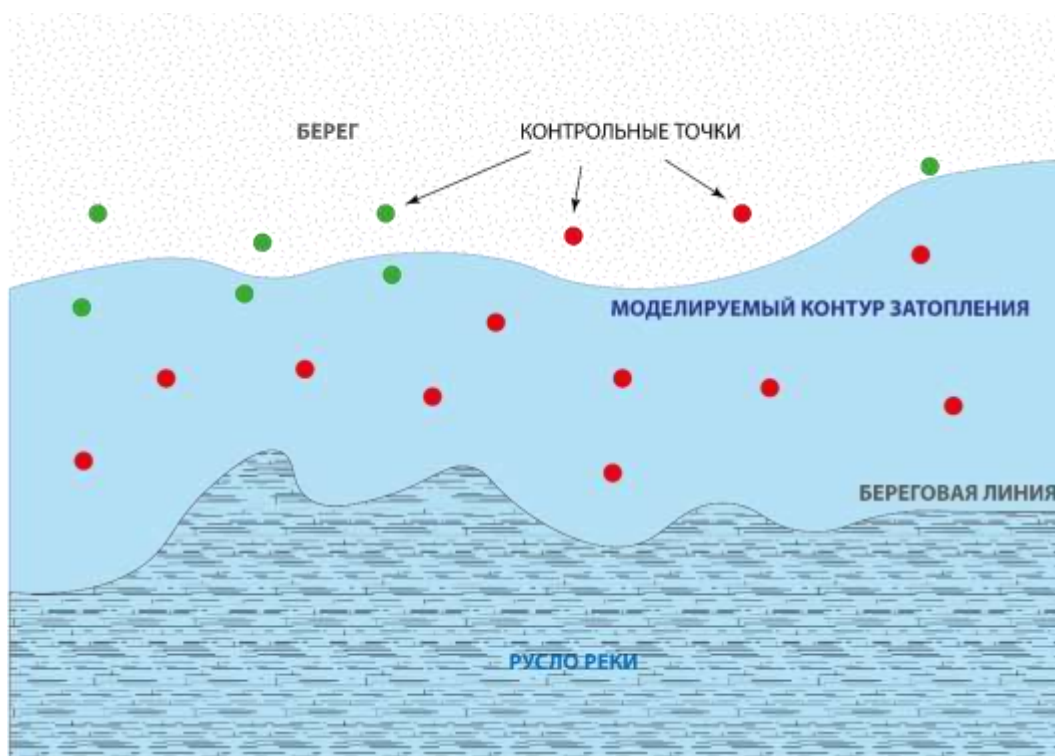


Рисунок 2.9 – Фрагмент моделируемой ситуации речного наводнения с указанием контрольных точек

На основе этого метода в данной диссертационной работе выполняется оценивание показателя точности функционирования ПК прогноза наводнения. Значения показателя определяется по формуле:

$$P = 100\% - \frac{N_e}{N_T} \quad (2.5)$$

где  $N_e$  – количество контрольных точек, в которых моделируемое состояние затопления не совпало с фактическим,  $N_T$  – общее количество контрольных точек.

Подробное описание процедуры выбора контрольных точек выходит за рамки данной диссертации. Ключевым требованием является размещение точек в пределах нижней и верхней границ паводкоопасных территорий. Нижняя граница совпадает с урезом воды при меженных расходах. Верхняя граница соответствует границе затопления при прохождении паводков 1% обеспеченности с вероятностью повторения 1 раз в 100 лет.

Очевидно, что проводить сравнение точности моделирования наводнения и использованием приведённого показателя имеет смысл только при неизменной сети контрольных точек при каждом измерении.

Предложенный способ оценивания точности прогноза позволяет не только проводить верификацию результатов моделирования, но и выполнять параметрическую адаптацию моделей.

Как было указано выше, параметрическая адаптация выполняется за счёт коррекции эмпирических параметров – коэффициентов шероховатости. Для их целенаправленного изменения необходимо всю зону моделирования разбить на однородные участки, объединённые по признаку совпадения моделируемой и фактической зоны затопления. На рисунке 2.10 показано, что в данном фрагменте модели можно выделить три зоны – «избыточного» затопления, «недостаточного» затопления и зону совпадения.

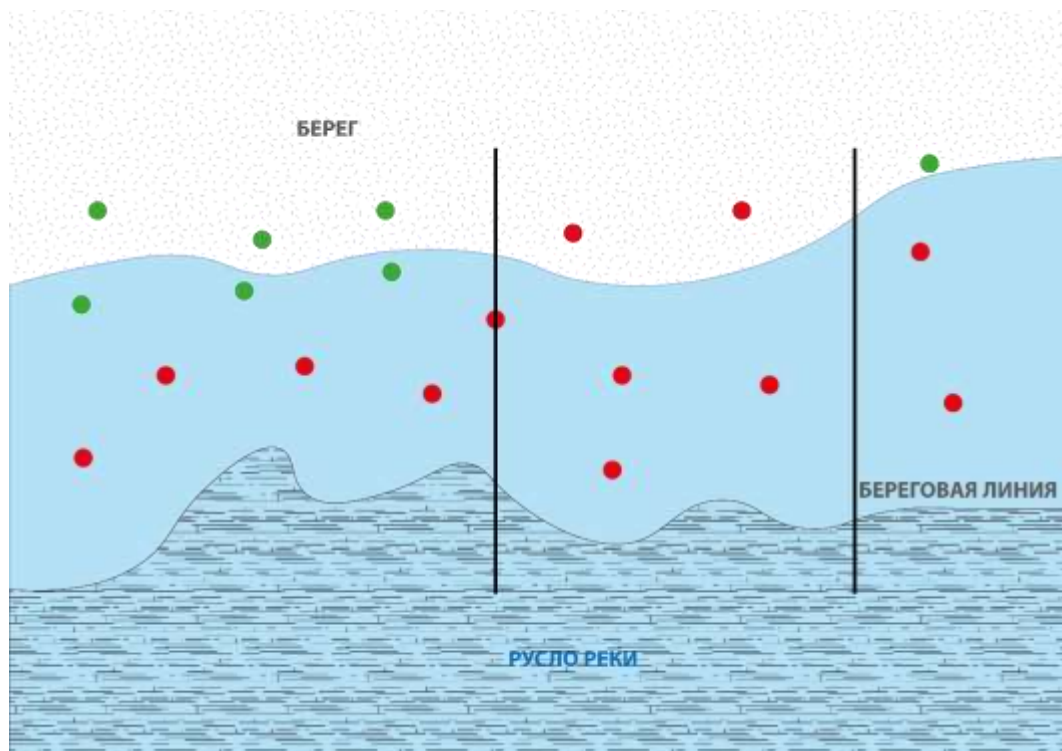


Рисунок 2.10 – Фрагмент моделируемой ситуации речного наводнения с разделением на зоны «избыточного» затопления, «недостаточного» затопления и зоны совпадения

Далее, объединяя сетку модели с выделенными зонами, можно определить перечень узлов, для которых требуется провести коррекцию параметров (рисунок 2.11).

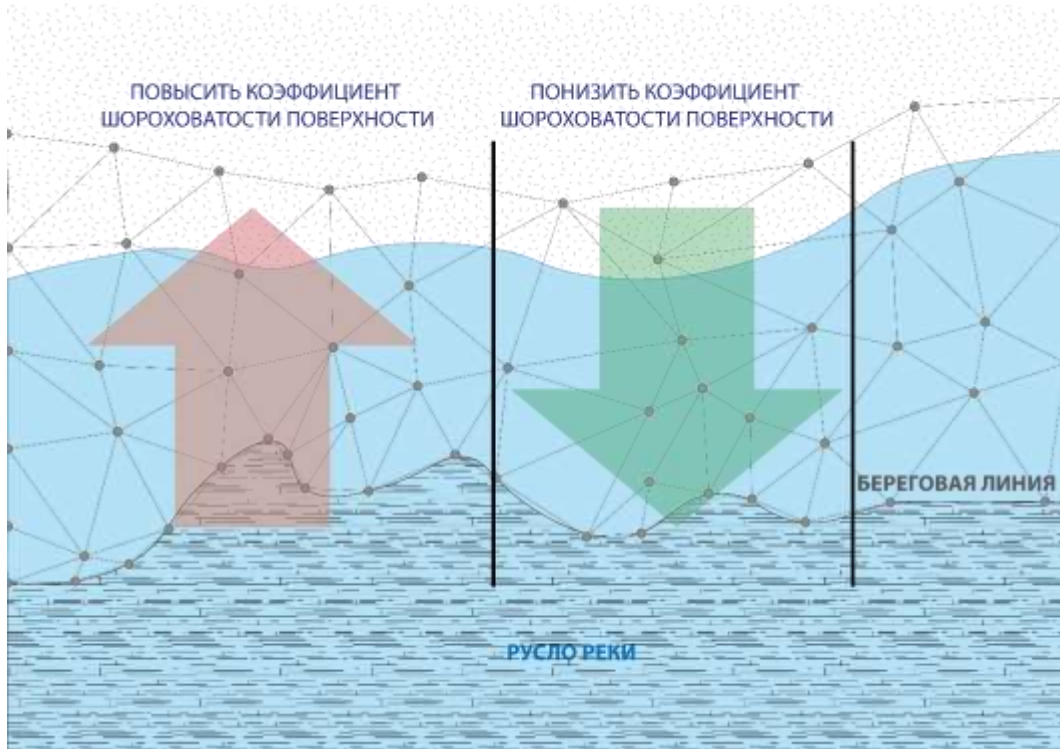


Рисунок 2.11 – Фрагмент моделируемой ситуации речного наводнения с указанием регулярной сетки и зон «избыточного» затопления, «недостаточного» затопления и зоны совпадения

В результате проведённой процедуры параметры модели будут скорректированы таким образом, чтобы на следующей итерации расчёта более точно учесть реальные характеристики окружающей среды.

Таким образом, основанный на описанных исходных предпосылках алгоритм валидации ПК РСММ включает следующие шаги:

1. Нанесение нерегулярной сетки на анализируемую территорию и определение состава контрольных точек.
2. Определение фактических границ зон поражения (затопленных территорий) на основе предложенного алгоритма совместного использования оптических и радарных данных ДЗЗ.
3. Определение совпадений результатов моделирования с фактическим состоянием территории на один и тот же момент времени по принципу наличия или отсутствия поражения (затопления) в контрольных точках, определение множества контрольных точек, где совпадения не наблюдается.

4. Разбиение зоны моделирования на однородные участки, сформированные по признаку совпадения или не совпадения моделируемой и фактической зоны затопления.

5. Расчет точности моделирования.

6. При необходимости подстройки моделирующих сервисов - определение перечня узлов нерегулярной сетки, для которых требуется провести коррекцию параметров модели.

Важно отметить, что с использованием описанного в параграфе 2.4 алгоритма совместного использования оптических и радарных ДДЗЗ появляется возможность проводить валидацию ПК и адаптацию моделей ПШТО полностью в автоматическом режиме.

Предложенный алгоритм реализован программно и прошел апробацию в ходе экспериментальных исследований, описанных в 4 главе. Его применение позволяет реализовать обратную связь в задачах моделирования ПШТО и тем самым существенно повысить точность моделирования. Как будет показано в 4 главе, достигаемая при моделировании речных наводнений точность прогнозирования контуров затопляемых территорий при применении представленного алгоритма достигает 92%.

## **2.6. Выводы по разделу 2**

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.

### **3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СОСТАВЕ РСКМ РЕЧНЫХ НАВОДНЕНИЙ**

#### **3.1. Состав и архитектура программного комплекса РСКМ на примере речных наводнений**

##### **3.1.1. Общий состав программного комплекса**

Как отмечено в главе 1, в состав РСКМ в общем случае входят следующие подсистемы:

- подсистемы получения, ввода и интегрированной обработки данных наземных измерений и материалов аэрокосмосъемки;
- информационно-моделирующая подсистема, включающая комплекс модулей и сервисов гидрологического моделирования, а также технологии выбора и адаптации указанных моделей;
- подсистема визуализации и доступа к результатам моделирования на основе геопортальных решений и веб-технологий [79, 99].

Соответствующая обобщенная схема РСКМ для задач мониторинга и прогнозирования речных наводнений (РСКМН) может быть представлена в виде, показанном на рисунке 3.1 [10, 80, 132, 99].

При разработке программного комплекса данной РСКМ следует учитывать ряд особенностей, определяющих конкретную реализацию трех указанных подсистем.

##### *1. Сервисы моделирования наводнений*

Для моделирования наводнений используются модели двух типов: гидрологические модели формирования стока «на входе» в анализируемый участок русла реки, а также гидродинамические модели распространения воды по руслу.



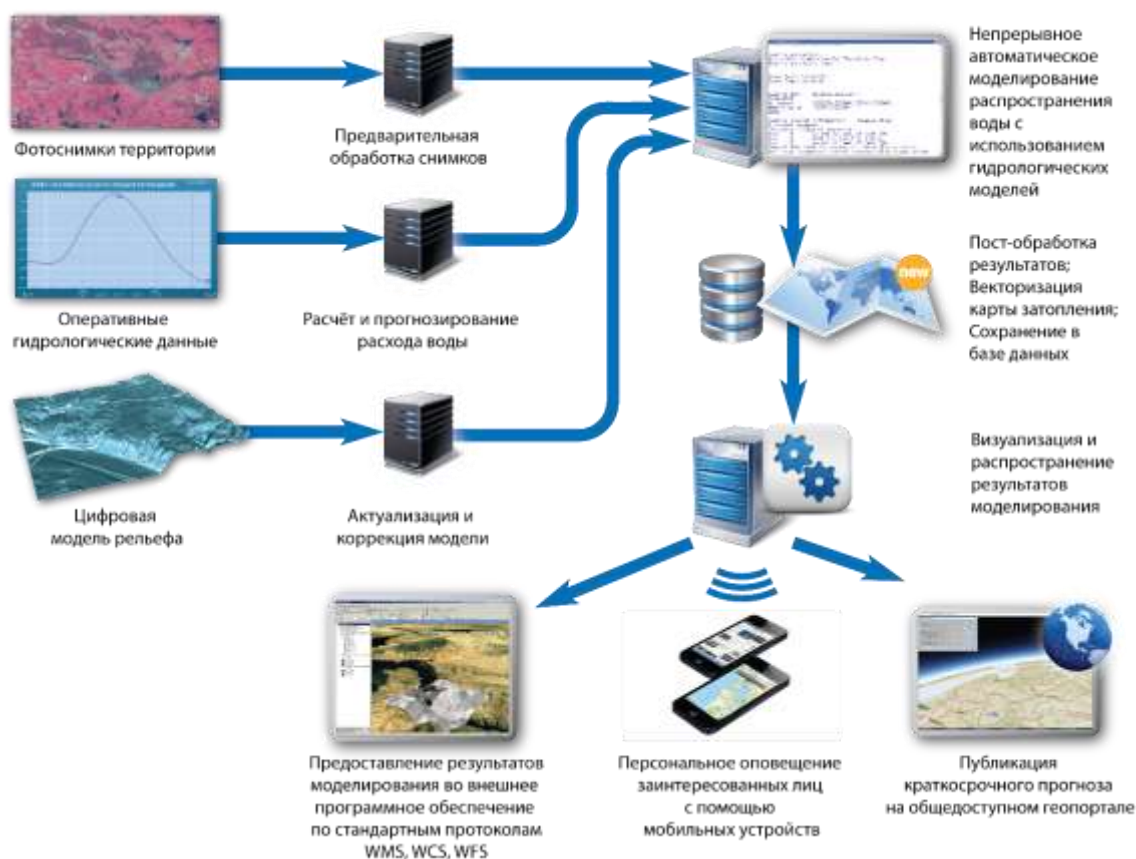


Рисунок 3.1 – Обобщенная схема РСКМ речных наводнений

Для того, чтобы получить прогноз высокого качества, расчеты необходимо производить с применением комплекса (ансамбля) гидрологических и гидродинамических моделей, при этом обеспечивая возможность выбора типа и параметров моделей, который зависит от таких факторов как характеристики участка моделирования, характер движения воды по руслу и пойме, используемый набор входных и пр. [99]. В рамках предлагаемого подхода в качестве основы для выбора сервиса моделирования, а также структурной и параметрической и адаптации параметров модели, наиболее адекватной для каждой конкретной ситуации, используется концепция многомодельного описания ППТО [12, 13].

Для формирования сервиса моделирования процессов формирования стока на водосборе за основу взяты разработанные в Институте водных проблем РАН гидрологические модели, основной из которых является ECOMAG (автор – Мотовилов Ю.В.) [133]. Модель ECOMAG позволяет рассмотреть на основе входной метеорологической информации об осадках,

приземной температуре воздуха и дефиците влажности воздуха основные процессы формирования стока – поступление воды на поверхность водосбора, инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почв, формирование снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного, внутрипочвенного, грунтового и общего речного стока [134], результатом моделирования являются расходы воды в любой точке речной сети бассейна.

В последнее время в гидрологическом моделировании находят все большее применение методы искусственного интеллекта, которые в ряде случаев позволяют получить приемлемые для практики результаты по точности и оперативности расчетов при сравнимых с классическими методами затратах на выполнение расчетов. В экспериментальных исследованиях также использовался сервис моделирования на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) [12] как альтернатива сервиса на базе модели ECOMAG.

Поскольку модели формирования стока относительно упрощенно описывают движение талых или дождевых вод по русловой сети, не учитывают реальной морфологии русел, то они должны комбинироваться с блоками гидродинамических моделей на наиболее ответственные участки рек. Примерами моделей, которые используются сегодня в мировой практике при выполнении расчетов, являются следующие: отечественные программные комплексы Flood, River и STREAM\_2D (разработчики - В.В. Беликов, А.Н. Милитеев и др. [135]), Mike Датского гидрологического института [136], Delft 3D Института Deltares г. Дельфт (Нидерланды) [137], HEC-RAS Американского корпуса военных инженеров [138], FLO-2D [139], французский TELEMAC [140] и др. [12, 99]. В российской практике наиболее широкое применение нашла модель River, которая была обновлена в 2014 г. и зарегистрирована в Роспатенте как STREAM\_2D [10, 135, 141].

В рассматриваемой разработке в качестве базовых гидродинамических моделей, успешно апробированных для р. Северная Двина, использованы одномерная модель RIVER\_1D и двумерная модель STREAM\_2D. Гидродинамические модели основаны на численном решении системы

уравнений Сен-Венана, которые являются базовыми в вычислительной гидравлике открытых потоков. Отличительной особенностью российских гидродинамических моделей RIVER\_1D и STREAM\_2D является наличие блока моделирования ледовых заторов, что крайне актуально для большей части территории России. Предлагаемое совместное применение программных комплексов, реализующих гидрологические и гидродинамические модели, позволяет выполнять полный цикл моделирования гидрологических процессов, начиная от участка водосбора реки целиком и заканчивая локальными участками речной сети.

Необходимо отметить, что использование, в основном, перечисленных моделей не является ограничением, поскольку к настоящему времени получен также успешный опыт включения в состав РСКМ речных наводнений европейской модели LISFLOOD [142] (подобный опыт получен, например, при выполнении проекта приграничного сотрудничества INFROM программы ESTLATRUS, 2012-2014 гг. [143]), а также моделей линейки DHI и программных продуктов института DELFT. Вместе с тем, предложенный подход позволяет реализовать общую технологию автоматизации полимодельного прогнозирования и апробировать ее на территории РФ с максимальным учетом имеющихся природных условий и особенностей исходных гидрометеорологических данных, определяющих гетерогенность информационной среды моделирования.

## *2. Состав исходных данных*

Учитывая особенности задач моделирования наводнений, а также потребности конкретных прогнозирующих моделей, в качестве основных исходных данных, используемых в рамках разработанной РСКМН, рассматривались три группы данных [10, 144, 145, 146]:

1. Данные, формируемые по результатам автоматизированной обработки материалов аэрокосмической съёмки для создания цифровой картографической основы района интереса (включая русло реки, объекты

инфраструктуры, гидротехнические сооружения и пр.), цифровой модели рельефа (ЦМР), валидации РСКМН.

2. Результаты измерений уровня и расхода воды с гидрологических постов, которые могут быть переданы по каналам связи и автоматически загружены в комплексы моделирования благодаря существующим сегодня и активно применяемым мобильным оперативно устанавливаемым регистраторам уровня.

3. Данные краудсорсинга, которые могут быть использованы для калибровки моделей и валидации РСКМН.

Дополнительную группу исходных данных составляют сведения об инфраструктуре, домах, хозяйственных постройках, и других объектах, расположенных в опасных районах. Эти данные используются для оценивания потенциального ущерба от наводнений.

При этом в основу разрабатываемой системы прогнозирования положена рассмотренная в разделе 2 технология интегрированной обработки указанной исходной информации, обеспечивающая синхронизацию времени поступления различных входных данных (включая ДДЗЗ).

### *3. Выходные данные*

Важнейшим этапом функционирования РСКМН, определяющим степень доступности результатов прогнозирования развития ЧС и возможности их оперативного использования, является интерпретация результатов расчетов и их предоставление пользователям. К числу основных параметров, получаемых в результате оперативного прогнозирования наводнений и представляющих наибольший интерес для конечного пользователя, относятся следующие: границы потенциально затопляемых участков, глубины затопления и скорости течения в каждый момент времени на прогнозируемом интервале. Для доведения результатов до конечных пользователей предпочтительнее всего визуализировать динамику изменения границ, глубин затопления и скоростного поля потока на картографической основе, отображающей объекты в пределах затопленной территории.

Согласно выполненным исследованиям, рекомендуется реализовать выходные данные моделирования как веб-сервисы и обеспечить доступ к ним со стационарных и мобильных персональных цифровых устройств (включая смартфоны, планшеты и пр.) [10].

### 3.1.2. Обобщённая архитектура программного комплекса

В соответствии с постановкой задачи и исходными предпосылками для исследований, в качестве базового подхода к структурному построению РСКМ речных наводнений используется сервис-ориентированная архитектура, обеспечивающая гибкое взаимодействие программных модулей, реализующих гидродинамические и гидрологические модели, модулей сбора и обработки разнородных данных, включающих данные с гидропостов и данных ДЗЗ, управляющих модулей, и т.д. При этом все компоненты системы реализуются как веб-сервисы, они могут быть территориально распределены и локализованы в различных организациях, городах и странах [12].

Согласно выполненным исследованиям, схема РСКМ речных наводнений, в состав которой входят все требуемые модули, может иметь вид, представленный на рисунке 3.2 (функциональная структура данной системы показана на рисунке 2.4).

К числу основных разработанных в ходе исследований архитектурных и программных решений, обеспечивающих реализацию представленной в предыдущих разделах технологии полной автоматизации КМ, относятся следующие [1, 12, 73]:

- функциональная схема РСКМН на языке BPMN 2.0, интерпретируемая внутри сервисной шины, которая представлена открытым программным продуктом WSO2 Enterprise Integrator [147];
- управляющий модуль, осуществляющий выбор сервисов (оперативное формирование функциональной структуры РСКМН) на основе решения задачи многокритериальной оптимизации;
- подсистема оперативной визуализации результатов моделирования на базе веб-картографии, представленная программным

обеспечением для отображения данных GeoServer и системой управления базой пространственных данных PostgreSQL с дополнением PostGIS;

- сервис сбора данных с гидрологических датчиков;
- сервис оперативной загрузки (каталогизации) данных ДЗЗ;
- модуль универсального доступа к моделям, включающий сервисы управления гидрологическими и гидродинамическими моделями и сервис работы со слоем абстракции данных;
- сервис автоматического обнаружения заторных явлений;
- сервис анализа рисков затопления объектов инфраструктуры;
- сервис интерпретации прогноза и формирования контуров затопления;
- хранилище результатов моделирования;
- сервис публикации результатов моделирования;
- пользовательский веб-интерфейс в виде прогрессивного веб-приложения, который адаптирован для работы со стационарных и мобильных устройств и обеспечивает при этом выполнение принципиального требования о необходимости минимизации специальных знаний пользователя для использования информационных систем;
- вспомогательные сервисы.

Детальная схема РСКМН, обобщающая и детализирующая схемы с необходимыми функциональными компонентами и технологиями (рисунки 1.5, 2.4, 3.1), разработанная для участка р. Северная Двина и использованная для проведения апробации предложенных методов и алгоритмов, изображена на рисунке 3.2.

Все представленные на схеме сервисы были разработаны в рамках данной диссертационной работы. Стандартные компоненты, такие как сервисная шина, СУБД, сервер администрирования и мониторинга были адаптированы и сконфигурированы для обеспечения работоспособности РСКМН.

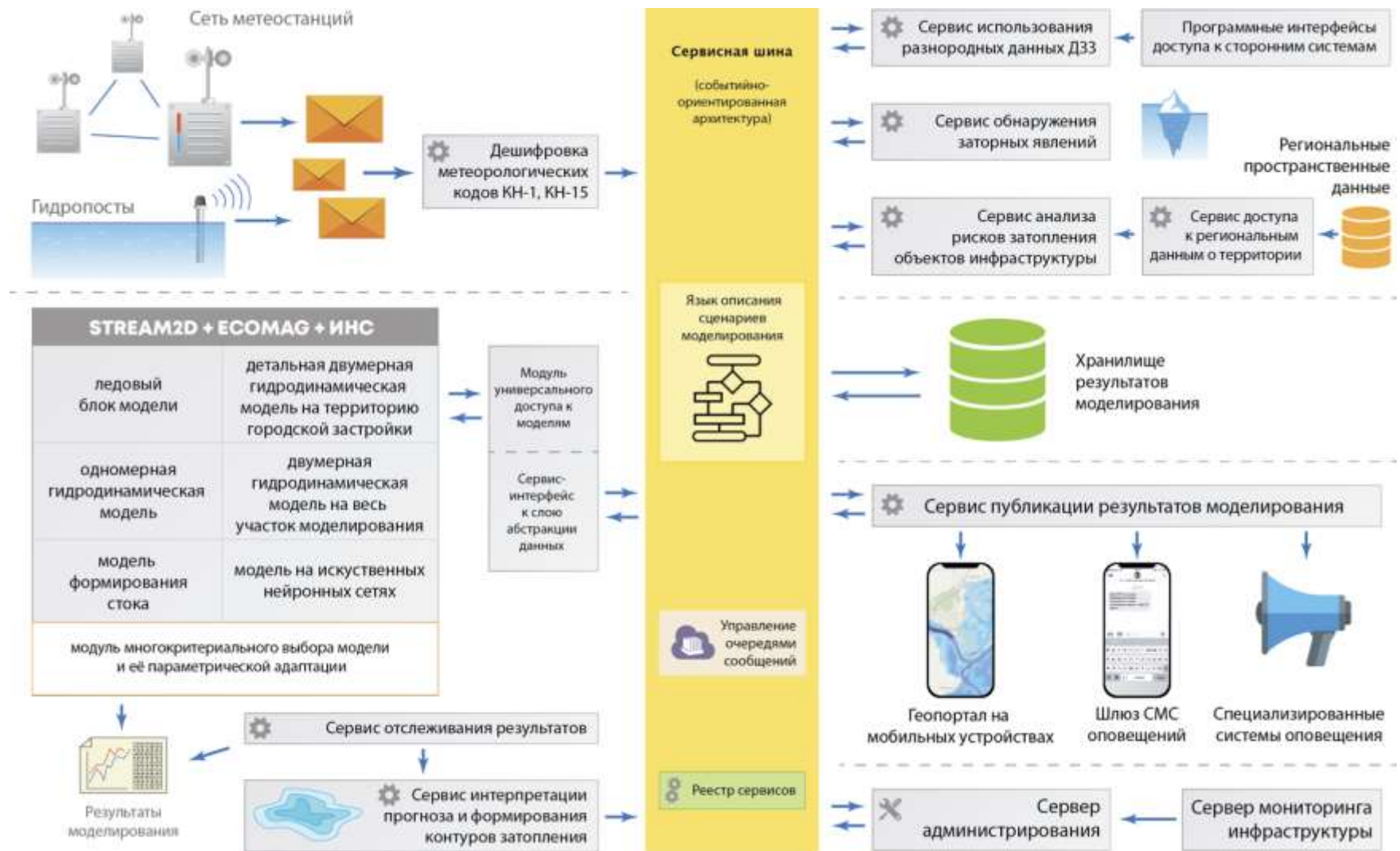


Рисунок 3.2 – Обобщённая архитектура РСКМ речных наводнений

В основе реализации данной схемы лежит алгоритмическое и методическое обеспечение, представленное во второй главе. Так, программное исполнение разработанных сценариев BPMN осуществляется встроенным в сервисную шину интерпретатором. Модуль многокритериального выбора модели и её параметрической адаптации реализует алгоритм выбора функциональной структуры программного комплекса РСКМ и синтезирует для указанного интерпретатора файл BPMN. При этом динамическое изменение состава используемых моделей становится возможным благодаря использованию реестра сервисов, также встроенных в сервисную шину. 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 упомянутым выше модулем многокритериального выбора модели и её параметрической адаптации для реализации методики валидации программного комплекса РСКМ на основе данных ДЗЗ.

### **3.2. Особенности программной реализации компонентов РСКМ речных наводнений**

Ряд компонентов, представленных на рисунке 3.2, имеет свои уникальные особенности программной реализации. Каждый из них использует определённую технологию сервис-ориентированного взаимодействия в ПК РСКМ, описанную в первой главе диссертации, либо алгоритмическое и методическое обеспечение автоматизации распределенных систем комплексного моделирования. Далее представлены компоненты, чья программная реализация требует более детального рассмотрения.



### 3.2.1. Модуль многокритериального выбора модели и её параметрической адаптации

Сервис представляет собой программный модуль, реализованный с помощью прямого программирования на языке Python. Математическая модель, реализуемая сервисом, описана в параграфе 1.4 и сводится к следующему:

Для того, чтобы решить определенную задачу моделирования, требуется сформировать состав компонентов РСКМ, который при заданном алгоритме функционирования системы и имеющейся номенклатуре сервисов с заданными показателями качества позволит минимизировать затраты на её функционирование и максимизировать показатели оперативности и целевого показателя качества моделирования [6].

Программно сервис решает задачу многокритериального выбора на дискретном множестве допустимых альтернатив (рисунок 2.4), используя для этого набор математических библиотек SciPy, в частности – функцию `scipy.optimize.linprog`.

Промежуточным результатом работы сервиса является словарь «ключ-значение», содержащий в качестве ключа наименование операции из функциональной структуры РСКМ, записанной на языке BPMN, а в качестве значения – идентификатор конкретного сервиса, который назначен на выполнение этой операции. Иллюстративный пример получаемого словаря приведён в таблице 3.1.

Таблица 3.1 –Пример словаря «ключ-значение»

Системное наименование операции	Идентификатор сервиса (URL)
s005_init_data_discharge	http://172.16.5.29:12002/soap_api/ai.wsd1
s009_depth_calc	http://172.16.5.29:12005/soap_api/sen-wen.wsd1

После решения задачи выбора сервисов происходит формирование окончательной функциональной структуры РСКМН. В синтезированный BPMN файл вписываются так называемые конечные точки сервисов (endpoints). Сформированный файл автоматически отправляется в сервисную шину к интерпретатору языка BPMN. Интерпретатор исполняет полученный файл, тем самым осуществляя оркестровку и согласование работы всех сервисов автоматически. Иллюстративный пример фрагмента синтезированного BPMN файла приведён в листинге 3.1.

### Листинг 3.1 - 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>
```

### 3.2.2. Сервис обнаружения заторных явлений

Сервис представляет собой программный модуль, который реализован с помощью прямого программирования на языке Python. Алгоритм, реализуемый сервисом, представляет собой агрегированную упрощённую версию обобщенной процедуры описанной в [148]. Важным этапом работы сервиса с точки зрения автоматизации работы РСКМ является манипуляция с исходными данными моделей, а именно динамическое изменение карты рельефа дна и береговой линии в месте обнаружения затора. Эта функция позволяет существенно повысить адекватность моделирования при возникновении заторных явлений в ходе наводнения, однако её применение требует дополнительных исследований и экспериментов в будущем.

### 3.2.3. Сервис использования разнородных данных ДЗЗ

Одной из обязательных функций модуля является оперативная загрузка и упорядоченное хранение данных ДЗЗ, также далее называемая каталогизацией данных ДЗЗ.

В главе 1 были приведены примеры доступных источников ДДЗЗ, такие как Copernicus Open Access Hub [149], EarthExplorer [150], геопортал Роскосмоса [151] и др. На сегодняшний день существует несколько основных вариантов организации доступа к ДДЗЗ, необходимых для организации комплексного моделирования:

1. Ручной режим – поиск, выбор и загрузка осуществляется полностью вручную самим пользователем. Примером является геопортал Роскосмоса, получение данных которого, помимо полностью ручного ввода параметров заявки на ДДЗЗ и оформления сопроводительных документов, ещё также подразумевает взаимодействие со специалистами Научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) – оператора данных с отечественных КА. Получаемая при этом продукция может быть передана заказчику как на съемных носителях (предоставляемых потребителем), так и через FTP-сервер НЦ ОМЗ.

2. Автоматизированный режим – некоторые системы (в частности – Copernicus Open Access Hub и EarthExplorer) позволяют автоматизировать часть функций работы с ДДЗЗ, например: применить заданные ранее и сохраненные параметры поиска ДДЗЗ; оформлять заказ архивных данных без заполнения заявки; загружать данные.

3. Автоматический режим – поиск, подбор и загрузка данных выполняется полностью автоматически: такой режим, как правило, реализован в конкретных системах, использующих ДДЗЗ в качестве исходных данных для визуализации, решения отдельных практических задач (например, в сервисах Copernicus).

Одним из способов автоматизации получения ДДЗЗ является использование программного интерфейса приложения – Application Program

Interfaces (API). Примерами открытых источников данных, использующих API, являются упомянутые ранее сервисы ДДЗЗ Copernicus Open Access Hub, EarthExplorer, в том числе – в сфере ЧС – системы EFFIS, FIRMS, Geohazard TEP. Однако, описанная технология используется далеко не во всех сервисах и системах.

Отдельного внимания заслуживает вопрос хранения и каталогизации получаемых ДДЗЗ. В настоящее время, как правило, осуществляется запись полного объема поступающих потоков данных в слабоструктурированное файловое хранилище (на устройстве пользователя), без предварительного отделения метаданных, что крайне затрудняет работу по подбору необходимых материалов съемки для решения тематических задач. Причем при увеличении потока поступающих данных в связи с перспективами расширения потребности в их использовании и по причине увеличения числа и типов КА задача сортировки необходимых материалов космической съемки (равно как и их подбора) становится еще более трудоемкой.

Очевидно, что для обеспечения предъявляемых к КМ требований по оперативности, операции по поиску, выбору, хранению и загрузке ДДЗЗ в РСКМН должны быть максимально автоматизированы. Данная задача требует создания соответствующего функционального модуля каталогизации ДДЗЗ, функционирующего полностью без участия оператора, в автоматическом режиме.

Сервис каталогизации данных ДЗЗ (далее - каталогизатор) предназначен для:

- автоматической выгрузки поступающих данных ДЗЗ из файловой системы;
- извлечения метаданных снимка и информации о пространственной привязке;
- приведения метаданных снимков с различных КА и разных видов съёмочной аппаратуры к общему виду;
- размещения метаданных снимка в базе данных;

- организации доступа к данным через веб-интерфейс;
- формирование изображений для быстрого просмотра.

Наличие каталогизатора обеспечивает существенное повышение доступности данных ДЗЗ, увеличение производительности работы с ними, а также создает условия для снижения нагрузки на оператора данных ДЗЗ, обеспечивая возможность использования одних и тех же материалов съемки из централизованного каталога, например – из регионального каталога для решения различных тематических задач разными отраслевыми комитетами и другими заказчиками.

Кроме того, каталогизация данных ДЗЗ является первым этапом автоматизированного решения задач формирования заказов на поставку новых материалов космической съемки.

Сервис позволяет проводить каталогизацию снимков, поступивших от следующих отечественных КА ДЗЗ:

- Ресурс-П (съёмочная аппаратура - КШМСА, Геотон, ГСА);
- Канопус-В и БКА.

Входными данными являются:

- файл космического снимка;
- файл метаданных;
- файл быстрого просмотра изображения (если прописан в файле метаданных).

В результате работы модуля формируются следующие выходные данные:

- контур космического снимка;
- метаданные космического снимка, приведённые к единому стандарту.

Визуально результаты работы сервиса представляются в виде, показанном на рисунке 3.3.

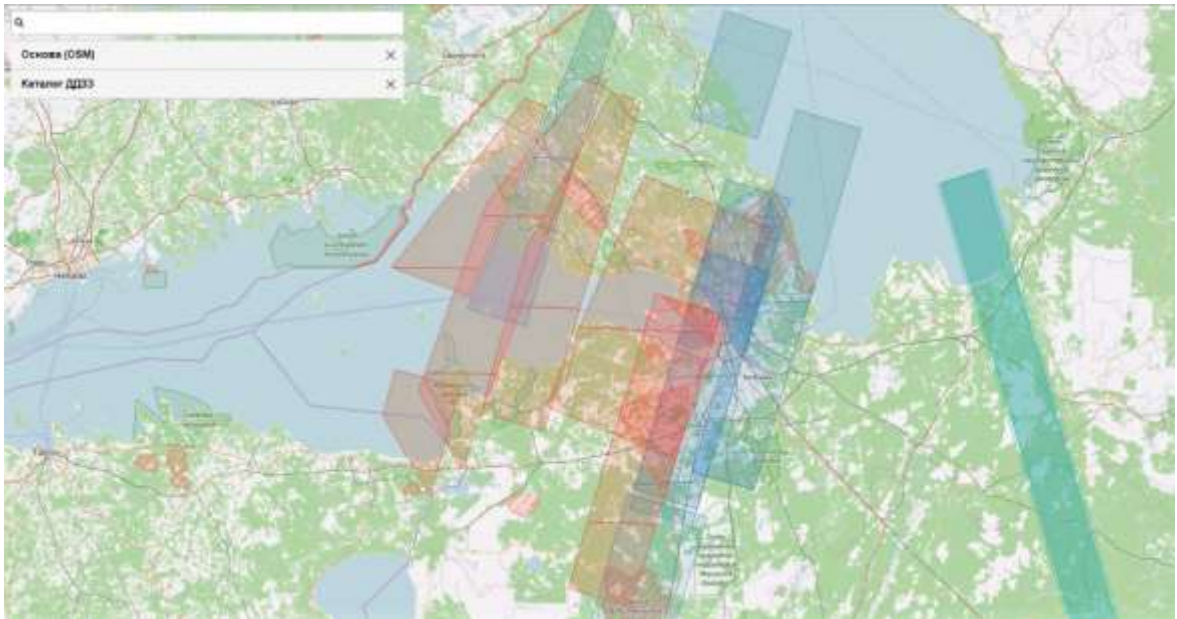


Рисунок 3.3 – Визуальное представление сервиса каталогизации ДДЗЗ

В основу реализации сервиса положены следующие принципы, обеспечивающие его функционирование как автономно, так и в составе РСКМ ЧС:

- использование открытого программного обеспечения;
- многопользовательский режим работы;
- однократный ввод информации и многократное ее использование;
- разграничение доступа к информации и операциям;
- обеспечение санкционированного доступа к результатам работы с помощью разного класса устройств (в том числе мобильных).

Сервис обеспечивает выполнение следующих основных функций [29]:

- автоматическое слежение за каталогом с входными данными;
- инициирование запуска процесса обработки данных при наличии во входящем каталоге необходимого набора метаданных (в формате .xml или .txt) и перечисленных в нём растровых изображений;
- идентификация поступающих данных на основании мета информации;
- автоматическое определение типа КА ДЗЗ и вида съёмочной аппаратуры;

- автоматический подбор необходимого драйвера для обработки определенного ранее типа данных;
- автоматическое извлечение семантических и пространственных данных;
- формирование векторного контура границы растрового изображения (при работе с данными, имеющими пространственную привязку в определённой драйвером системе координат);
- автоматическое занесение семантической информации пространственных и семантических данных в пространственную базу данных;
- индексирование семантических данных;
- занесение исходных данных в соответствующий файловый каталог (тип КА ДЗЗ/тип съёмочной аппаратуры/дата съёмки в формате ГГГГММДД/название сцены);
- организация санкционированного доступа к картографическому веб-интерфейсу с возможностью поиска и просмотра семантической информации и векторных контуров.

#### 3.2.4. Сервис анализа рисков затопления объектов инфраструктуры

Данный сервис функционирует совместно с сервисом доступа к региональным данным о территории. Модуль реализован в виде набора хранимых процедур в СУБД PostgreSQL. Разработанные процедуры используют функции работы с пространственными данными из расширения СУБД PostGIS. Хранимые процедуры управляются триггерными процедурами, отслеживающими поступление новых данных в систему. Такая техническая связка обеспечивает возможность полностью в автоматическом режиме формировать новые пространственные данные, которые могут быть использованы при анализе рисков. В реализованной РСКМ рассматриваемый модуль формирует слой с нанесёнными зданиями, попадающими в прогнозируемый контур затопления. В составе атрибутов объектов слоя присутствует значение глубины затопления каждого объекта.

Следует отметить, что качество и полнота данных, производимых этим сервисом, напрямую зависит от доступа к региональным данным о территории. Чем больше исходных данных будет предоставлено местными исполнительными органами, тем более широкий спектр услуг может быть реализован для конечного пользователя.

### 3.2.5. Сервис интерпретации результатов прогноза и формирования контуров затопления

В результате функционирования рассмотренных сервисов моделирования формируется набор из десятков текстовых выходных файлов, содержащих тысячи параметров (пример фрагмента одного из файлов приведён на рисунке 3.4).

13304	2100.50	2102.50	2104.50	2106.50	2108.50	2110.50	2112.50	2114.50	2116.50	2118.50
13305	2120.50	2122.50	2124.50	2126.50	2128.50	2130.50	2132.50	2134.50	2136.50	2138.50
13306	2140.50	2142.50	2144.50	2146.50	2148.50	2150.50	2152.50	2154.50	2156.50	2158.50
13307	2160.50	2162.50	2164.50	2166.50	2168.50	2170.50	2172.50	2174.50	2176.50	2178.50
13308	2180.50	2182.50	2184.50	2186.50	2188.50	2190.50	2192.50	2194.50	2196.50	2198.50
13309	2200.50	2202.50	2204.50	2206.50	2208.50	2210.50	2212.50	2214.50	2216.50	2218.50
13310	2220.50	2222.50	2224.50	2226.50	2228.50	2230.50	2232.50	2234.50	2236.50	2238.50
13311	2240.50	2242.50	2244.50	2246.50	2248.50	2250.50	2252.50	2254.50	2256.50	2258.50
13312	2260.50	2262.50	2264.50	2266.50	2268.50	2270.50	2272.50	2274.50	2276.50	2278.50
13313	2280.50	2282.50	2284.50	2286.50	2288.50	2290.50	2292.50	2294.50	2296.50	2298.50
13314	2300.50	2302.50	2304.50	2306.50	2308.50	2310.50	2312.50	2314.50	2316.50	2318.50
13315	1	1083783	460	1.400000	37.630000					
13316	2	1085108	460	1.400000	37.630000					
13317	3	1086433	460	1.400000	37.630000					
13318	4	1087758	460	1.000000	37.630000					
13319	5	1089082	460	1.400000	37.630000					
13320	6	1090407	460	1.400000	37.630000					
13321	7	1091732	460	1.000000	37.630000					
13322	8	1093056	460	1.400000	37.630000					
13323	9	1094381	460	1.400000	37.630000					
13324	10	1095706	460	1.000000	37.630000					
13325	11	1097030	460	1.400000	37.630000					

Рисунок 3.4 – Пример фрагмента выходного файла

Очевидно, такое представление крайне затруднительно для анализа ситуации и принятия решений, поэтому результаты моделирования требуют интерпретации и визуализации. Учитывая колоссальную сложность применяемых гидрологических и гидродинамических моделей, в рамках



диссертации использовались только результаты, относящиеся к глубине затопления в узлах нерегулярной сетки, описывающей рельеф русла и поймы реки. Однако и эти результаты не могут быть наглядно представлены на карте без дополнительных преобразований. Выполнение элементарных преобразований и приведение к какому-либо используемому формату пространственных данных приводит максимум к слою точек (см. рисунок 3.5).

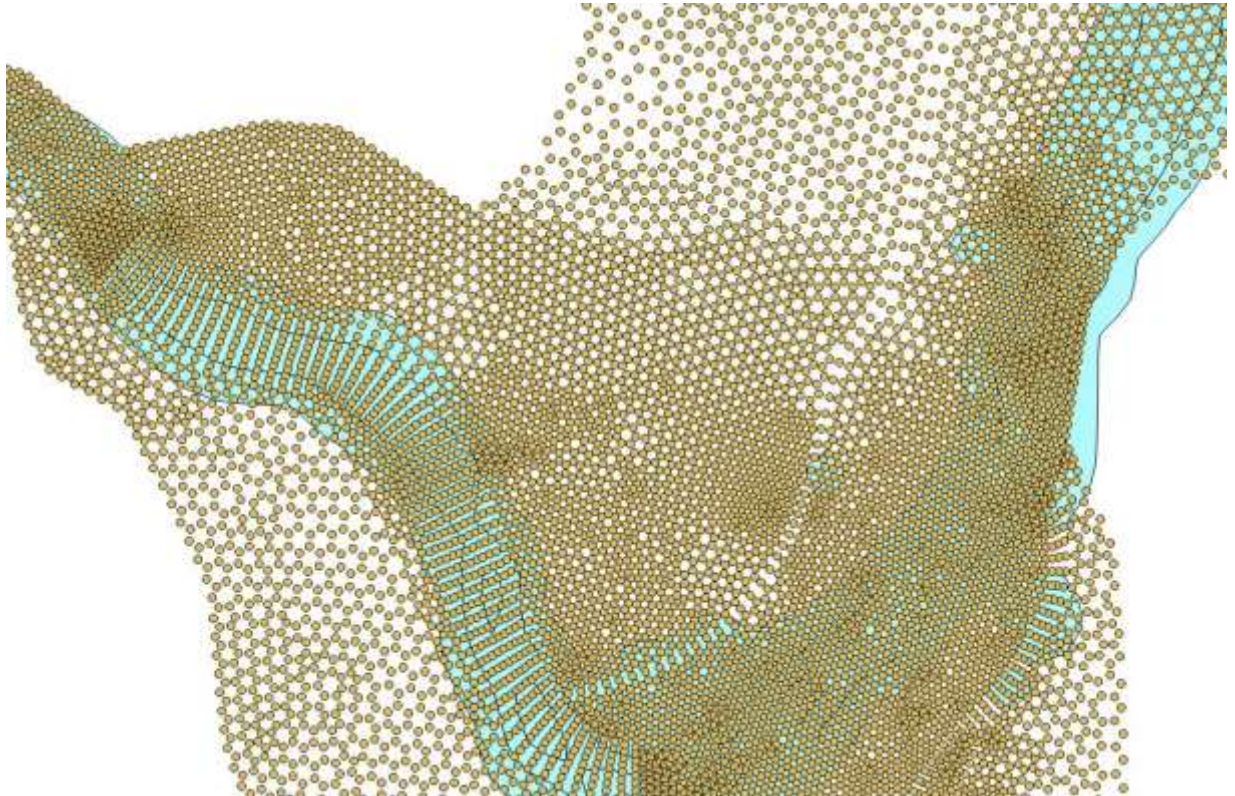


Рисунок 3.5 – Пример результатов моделирования глубин затопления в узлах нерегулярной сетки

Для получения контуров затопления потребовалось из матрицы глубин получить поверхность, затем построить изолинии поверхности с метровым шагом и упростить получившиеся контуры для снижения нагрузки на хранилище данных и веб-клиент.

Рассматривались различные методы сглаживания из библиотек работы с пространственными данными GDAL и GRASS: алгоритм Дугласа-Пекера, алгоритм упрощения Лэнга, алгоритм сокращения вершин, алгоритм Реймана-Виткама, алгоритм Макмастера, алгоритм Чайкина, интерполяция кубическими эрмитовыми сплайнами, и несколько других. Наиболее

удовлетворительные результаты для рассматриваемого масштаба и формы исходных данных показал алгоритм Дугласа-Пекера, так как традиционное гауссово сглаживание на используемом масштабе сетки избыточно заполняет впадины и выравнивает пики.

Так, вспомогательный сервис отслеживания результатов обнаруживает новые результаты моделирования, далее передаёт управление рассматриваемому сервису. После серии автоматических преобразований массив текстовых файлов трансформируется в набор сглаженных контуров для каждого метра затопления территории. Полученные данные отображаются на карте в привычном пользователю виде (см. рисунок 3.6).

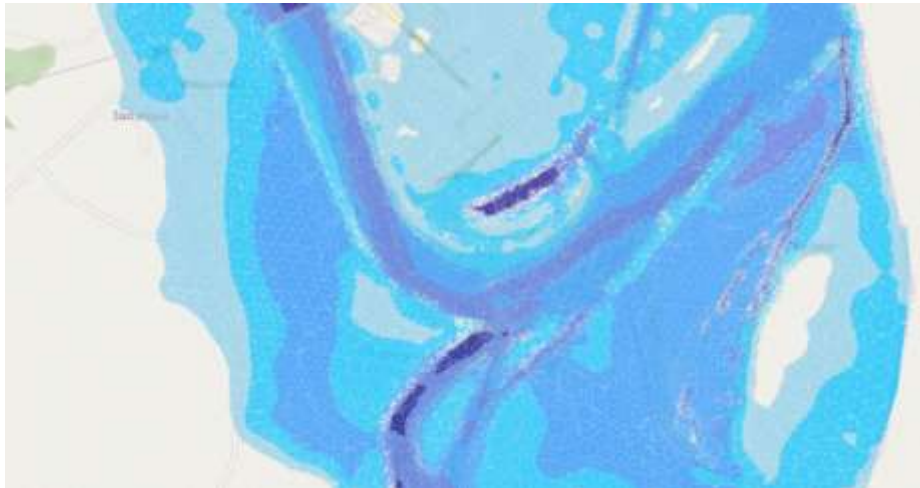


Рисунок 3.6 – Пример получаемых контуров затопления территории

### 3.2.6. Хранилище результатов моделирования

Для хранения данных используется битемпоральная база данных, а последний этап автоматизации полного цикла моделирования выполняется с использованием технологий веб-картографии, которые детально рассмотрены в параграфе 1.3.2. Для работы с темпоральными данными в веб-интерфейсе используется временная шкала, с помощью которой возможен просмотр исходных, исторических и прогнозируемых данных. Использование инструмента не требует от пользователя специальных знаний (формального языка запросов и пр.) – для просмотра данных необходимо только перемещать ползунок шкалы (рисунок 3.7).

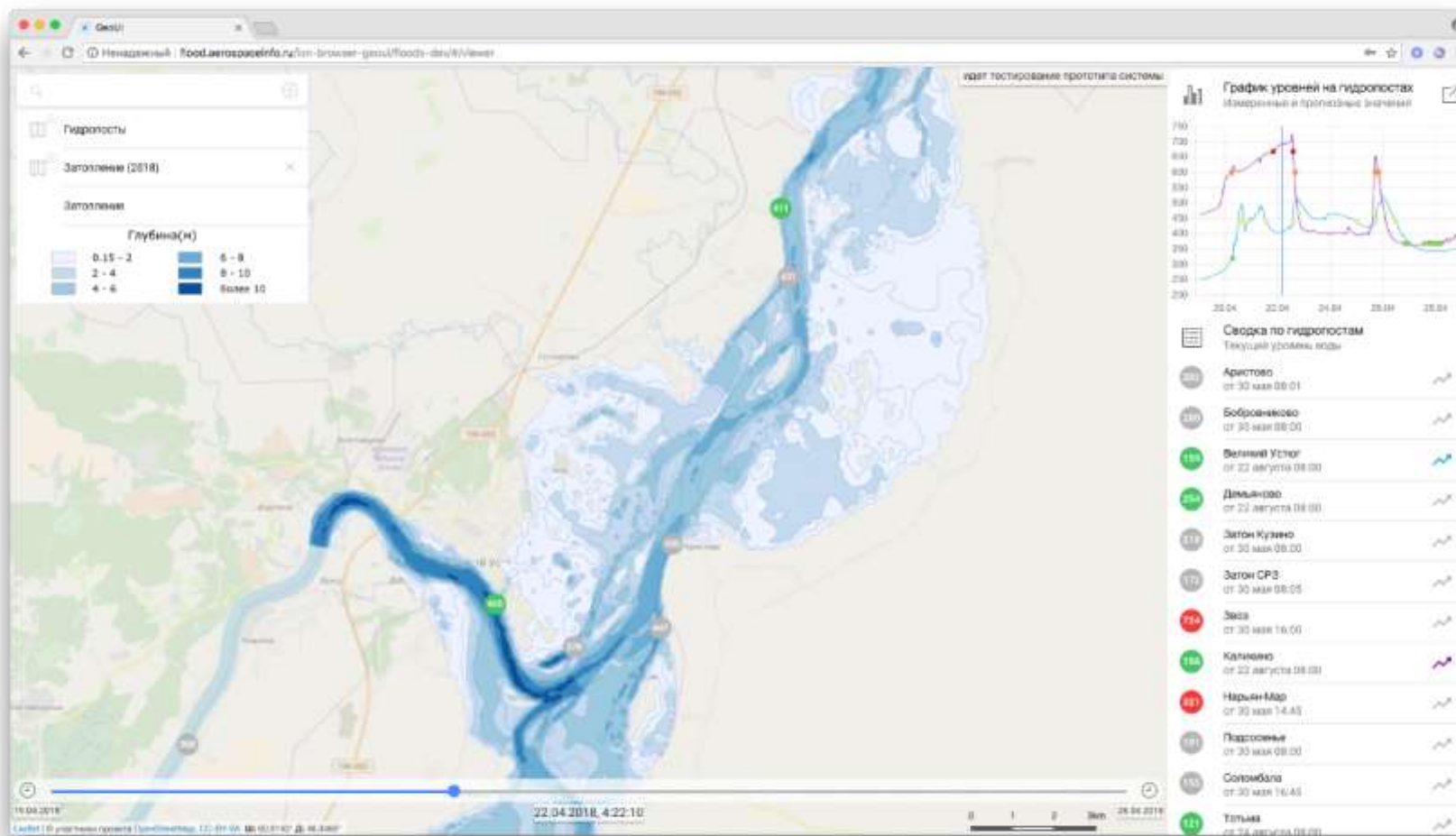


Рисунок 3.7 – Вид экрана веб-интерфейса РСКМ с временной шкалой

### 3.2.7. Сервис публикации результатов моделирования

Сервис построен в соответствии с результатами исследований, изложенными в пункте 1.3.2. В основе сервиса лежит веб-картография, реализуемая на базе свободно распространяемого программного обеспечения. Согласно проведённым тестам, лучшие результаты показал программный продукт Geoserver. Поэтому весь сервис построен с использованием этого решения.

При выборе между векторными и растровыми тайлами предпочтение было отдано растровым тайлам вследствие использования большого количества данных дистанционного зондирования Земли, являющихся растровыми данными. Поэтому основным форматом передачи данных веб-картографии в разработанной РСКМ выбран Web Map Service (WMS).

Стоит отметить, что все доступные растровые геосерверы не рассчитаны на высокую нагрузку и большое количество пользователей. Опытным путём было установлено, что максимальное количество тайлов, генерируемых геосервером (количество транзакций) в созданной системе – 30 в секунду. При такой скорости генерации данных может быть обеспечена комфортная работа всего 3-5 пользователей системы. Под комфортной работой в данном случае подразумевается время генерации тайла, не превышающее 300 мс. В пункте 1.3.2 подробно рассмотрены варианты ускорения работы геосервера. На практике при создании РСКМ потребовалась комбинация различных методов.

Так, все слои были разделены на статические и динамические. Разделение происходило исходя из скорости обновления данных в этих слоях и наличия темпоральных данных. В категорию статических слоёв были отнесены все данные о территории: здания, дороги, сети, и т.д., а также все данные ДЗЗ (спутниковые снимки). Категория динамических слоёв включала в свой состав данные о наводнении, метеоявления, данные с датчиков, любые темпоральные данные.

Для статических слоёв была развёрнута система кеширования GeoWebCache, интегрирующаяся с геосервером. Эта система реализует

механизм Server static tiling, описанный во втором разделе диссертации. Скорость отдачи тайлов пользователю достигает 500 тайлов в секунду для созданной РСКМ. Это позволяет обслуживать до 80 одновременных пользователей системы.

Динамические и темпоральные слои продолжали поставляться напрямую из геосервера. Но так как динамические данные при типовом сценарии работы с РСКМ составляли всего примерно 20% от общего количества отображаемых данных, то общая производительность системы отображения картографических данных позволяла поддерживать комфортный уровень работы приблизительно 20 одновременно активных пользователей.

### 3.2.8. Вспомогательные сервисы

Кроме описанных выше сервисов и компонентов, в РСКМ использовался ряд готовых решений, конфигурирование и интеграция которых выполнялась стандартными методами, не требующими проведения дополнительных исследований.

Так, сервисная шина использовалась в «коробочном» варианте, настройка производилась по базовой документации. Сервисная шина WSO2 позволяет реализовать событийно-ориентированную архитектуру, имеет механизмы управления очередями сообщений, включает в свой состав интерпретатор BPMN, а также предоставляет реестр сервисов.

Сервис дешифровки метеорологических кодов был разработан в рамках настоящей диссертации, и при его реализации потребовалось чёткое следование существующим нормативным документам, описывающим метеорологические коды.

Сервис администрирования основывался на сервере мониторинга инфраструктуры Nagios. Были разработаны сценарии действий и оповещений при возникновении нештатных ситуаций и сбоев в работе программного комплекса.

В целом, ПК РСКМ речных наводнений, разработанный на базе описанных программных средств и в соответствии с синтезированной технологией, *в автоматическом режиме* реализует полный цикл моделирования: от сбора исходных данных с гидрологических датчиков до визуализации результатов оперативного прогнозирования наводнений в веб-интерфейсе. Для визуализации выходных данных в пользовательском интерфейсе формируемые по результатам работы РСКМ записи в базе пространственных данных преобразуются геосервером в WMS. Для работы с выходными данными прогнозирования веб-интерфейс системы содержит минимальный набор инструментов, а именно – поисковую строку, текущий список визуализированных данных, временную шкалу для работы с темпоральными данными. Обеспечиваемая РСКМ полная автоматизация вычислительного процесса позволяет скрыть от пользователей сложность её функционирования, обусловленную применением разнородных территориально распределённых программных компонентов, и тем самым расширить круг её потенциальных пользователей от ГИС- и ИТ-специалистов до специалистов в предметной области (гидрологии) и иных заинтересованных пользователей (в частности – представителей органов исполнительной власти, служб по ЧС, коммерческих организаций, граждан и пр.) [12].

### **3.3. Выводы по разделу 3**

1. Разработан полнофункциональный программный прототип ПК распределенной системы комплексного моделирования на основе сервис-ориентированной архитектуры применительно к задаче оперативного прогнозирования речных наводнений, включая совокупность компонентов (программных модулей), реализующий предложенные технологии интеграции разнородных данных, алгоритмы обработки спутниковых данных, формирования функциональной структуры РСКМ, интерпретации и предоставления результатов пользователям, и др., совокупность которых

обеспечивает автоматизацию решения тематических задач РСКМ при использовании полимодельного подхода к описанию ППТО. Разработанный прототип ПК включает программные средства, которые обеспечивают организацию взаимодействия программных компонентов при комплексном моделировании широкого класса ППТО, в том числе при оперативном прогнозировании речных наводнений.

2. Принципиальная отличительная особенность разработанного ПК заключается в обеспечении полной автоматизации всех этапов работы распределенных компонентов системы комплексного моделирования и их совместного функционирования. ПК РСКМ речных наводнений, разработанный на базе описанных программных средств и в соответствии с синтезированной технологией, в автоматическом режиме реализует полный цикл моделирования: от сбора исходных данных с гидрологических датчиков до визуализации результатов оперативного прогнозирования наводнений в веб-интерфейсе. Для визуализации выходных данных в пользовательском интерфейсе формируемые по результатам работы РСКМ записи в базе пространственных данных преобразуются геосервером в WMS. Для работы с выходными данными прогнозирования веб-интерфейс системы содержит минимальный набор инструментов, а именно – поисковую строку, текущий список визуализированных данных, временную шкалу для работы с темпоральными данными. Обеспечиваемая РСКМ полная автоматизация вычислительного процесса позволяет скрыть от её пользователей сложность функционирования и применения разнородных территориально распределённых информационных систем и тем самым расширяет круг её потенциальных пользователей от ГИС- и ИТ-специалистов до специалистов в предметной области (гидрологии) и иных заинтересованных пользователей (в частности – представителей органов исполнительной власти, служб по ЧС, коммерческих организаций, граждан и пр.)

#### **4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОЗДАНИЮ И АПРОБАЦИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РСКМ НА ПРИМЕРЕ РЕЧНЫХ НАВОДНЕНИЙ**

##### **4.1. Общая характеристика экспериментальных исследований**

Как уже отмечалось в главе 1, одним из наиболее характерных и распространенных видов ППТО являются водные объекты с размещенной в прибрежной зоне инфраструктурой. К числу наиболее актуальных научно-практических задач относится создание и организация функционирования ПК прогнозирования состояния ППТО данного вида в условиях ЧС, обусловленных наводнениями, вызванными таянием снега, ливнями и другими причинами.

Это обусловлено высокой частотой возникновения и тяжестью последствий данных стихийных бедствий.

В соответствии с данными ФГБУ «ВНИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных», на территории РФ за первое десятилетие XXI века произошло в 1,5 раза больше опасных гидрологических явлений (наводнений, паводков и селей), чем в 1990-е гг. На сегодняшний день в России каждый год происходит от 40 до 70 крупных наводнений. При этом, согласно данным Росгидромета, их пространственный охват составляет около 500 тыс. км<sup>2</sup> (для наводнений с катастрофическими последствиями – 150 тыс. км<sup>2</sup>) и включает около 300 городов, десятки тысяч населённых пунктов, существенное количество хозяйственных объектов, более 7 млн. га сельскохозяйственных угодий. В результате, среднегодовой ущерб от данного вида ЧС составляет около 40 млрд. рублей. При этом, ограничено число технологических решений и прикладных систем, обеспечивающих ЛПР оперативной и достоверной информацией о развитии ЧС в удобном для своевременного анализа обстановки виде [12].

С точки зрения решения задач мониторинга и прогнозирования состояния выделенному классу ППТО присущи все рассмотренные выше требования к системам моделирования: необходимость применения



полимоделного подхода; большой объем и разнородность исходных данных для моделирования – как наземных, так и аэрокосмических; территориальная распределенность; необходимость обеспечения высоких достоверности и оперативности прогноза; сниженные требования к квалификации пользователей, которыми могут быть не только профессиональные метеорологи и специалисты по обработке данных, но и специалисты служб по ЧС, местных администраций, и др. Поэтому в данной работе апробация результатов, представленных во 2 и 3 главах, выполнена, в первую очередь, применительно к построению и организации взаимодействия компонентов ПК РСКМ речных наводнений при решении задач оперативного прогнозирования территорий и глубин затоплений.

Опыт практического применения автоматизированных систем моделирования речных наводнений службами по ЧС, а также административными органами федерального и местного уровней на сегодняшний день существенно ограничен вследствие невозможности использования общепризнанных зарубежных систем прогнозирования наводнений, не учитывающих особенности российских рек, а также текущим наличием большого количества открытых вопросов при разработке автоматизированных систем моделирования наводнений. К особенностям российских рек относятся, в первую очередь, разреженная сеть гидрологических и метеопостов, а также наличие на реках трудно прогнозируемых ледовых явлений, существенно влияющих на характеристики распространения воды по руслам и поймам рек. В последние годы российскими специалистами, в первую очередь, в Институте водных проблем РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова получены существенные результаты по разработке отдельных математических моделей развития наводнений на российских реках. Полученные решения успешно апробированы, однако носят локальный характер, не интегрированы с другими необходимыми компонентами систем моделирования, и применимы для отдельных участков русел рек и водосборных бассейнов. Кроме того, не реализованы процедуры

выбора наиболее адекватных моделей в процессе функционирования создаваемых систем, что снижает результирующую точность прогнозов. Результаты моделирования, которые формируются не оперативно, а в виде отчетов уже после произошедших наводнений, как правило, доступны узкому кругу разработчиков и исследователей, и в редких случаях предоставляются по запросу специалистам гидрометеослужб.

Проведенный в рамках диссертационного исследования анализ показал наличие и доступность технологий и компонентов, необходимых для разработки систем оперативного прогнозирования наводнений с требуемыми характеристиками, а именно – гидрологических моделей формирования стока и гидродинамических моделей распространения воды для различных типов русел и речных долин и соответствующих им программных модулей, которые характеризуются высокой степенью проработки и апробации [152, 153, 154], а также информационных технологий, требуемых для разработки комплексных систем [155, 156, 157, 158] (включая описанные в предыдущих разделах диссертационной работы). На основе интеграции перечисленных технологий осуществляется разработка распределенных систем КМ ППТО как нового класса систем [12].

В рамках диссертационных исследований данная цель достигается за счёт разработки и апробации полнофункциональный прототип ПК РСКМ применительно к решению задач мониторинга и оперативного прогнозирования речных наводнений. Разработка ПК выполнена на базе описанных выше результатов, связанных с созданием, развитием и адаптацией технологий, алгоритмов и программных средств автоматизации КМ ППТО.

Основной целью экспериментальных исследований являлась практическая проверка реализуемости и эффективности предложенных в диссертации алгоритмических, методических и программных решений по автоматизации функционирования РСКМ.

Для достижения этой цели в процессе экспериментальных исследований должны быть решены следующие задачи:

1. Программная реализация ключевых компонентов РСКМ речных наводнений (РСКМН) и организация их взаимодействия базе предложенных технологий и алгоритмов, обеспечивающая создание полнофункционального прототипа ПК РСКМН.

2. Практическое подтверждение реализуемости автоматизации функционирования РСКМ при использовании полимодельного подхода к описанию развития ЧС применительно к задаче прогнозирования речных наводнений.

3. Апробация функционирования РСКМН в различных режимах, включая полностью автоматическую работу на реальных исходных данных, в том числе в оперативном режиме прогнозирования речных наводнений.

Разработанные программные средства, необходимые для реализации комплексного моделирования и организации взаимодействия всех компонентов ПК, описаны в главе 3. Необходимо отметить, что в ходе разработки выполнено создание программных оболочек для модулей гидрологического и гидродинамического моделирования с целью создания соответствующих веб-сервисов и обеспечения взаимодействия с ними через сервисную шину. Общая структура РСКМН приведена на рисунке 3.2.

Созданный прототип ПК РСКМН апробирован в ходе выполнения серии экспериментальных исследований, основная часть которых приурочена к участку русла реки Северная Двина от г. Великий Устюг до г. Котлас (рисунок 4.1).

## Территория проекта



Рисунок 4.1 – Характеристика участка русла р. Северная Двина для экспериментальных исследований

Указанная территория характеризуется высокой частотой возникновения наводнений, сопутствующими им существенными экономическими потерями, но в то же время высокой степенью изученности данного района со стороны специалистов-гидрологов (включая многократную апробацию модулей для прогнозирования наводнений с высокой достоверностью полученных результатов), что обусловило выбор данного участка для выполнения экспериментальных исследований.

### 4.2. Основные результаты апробации программного комплекса РСКМН

Для апробации ПК РСКМ использованы исходные данные за 1998-2019 гг. Стоит отметить, что в весенний период 2018 года ПК РСКМ было протестировано в режиме реального времени: данная работа было согласована с Северным управлением Росгидромета, её результаты оперативно предоставлялись специалистам Росгидромета, МЧС и Администраций городов Архангельска, Вологды и Великого Устюга [12].

Эксперимент осуществлялся также в координации с Управлением космического мониторинга (УКМ) Национального центра управления в кризисных ситуациях (НЦУКС) МЧС России.

Для проведения апробации было организовано информационно – технологическое взаимодействие с Северным УГМС и его Вологодским филиалом для получения результатов наземных измерений практически в реальном масштабе времени, космические снимки с российских КА предоставлялись УКМ НЦУКС МЧС России. Активными участниками экспериментальных исследований по апробации ПК являлись специалисты по гидрологическому моделированию Института водных проблем РАН и кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова, в том числе авторы моделей ECOMAG и STREAM-2D.

Реализованная РСКМ структурно представляла собой территориально распределенный комплекс аппаратно-программных средств, отдельные компоненты которого располагались на территории Архангельской и Вологодской областей (гидропосты и автоматизированные гидрологические комплексы (АГК)), в г. Москва (компоненты, реализующие сервисы гидрологического моделирования на базе ECOMAG и гидрологического моделирования в Институте водных проблем РАН), а также в г. Санкт-Петербурге (сервисы сбора и интегрированной обработки наземно-аэрокосмических данных, модели ИНС, управляющие и интегрирующие компоненты системы, сервисы интерпретации и визуализации результатов моделирования).

Для мониторинга гидрологической обстановки на указанном участке использовались гидрологические данные с 12 стационарных и 5 временных гидропостов, а также данные о температуре с метеорологических постов, поступавшие в РСКМ в режиме реального времени для расчета уровней воды с применением ECOMAG и ИНС на основе подходов, представленных в [12]. Прогнозирование уровня воды выполнялось на основе данных с 3 постов, расположенных на притоках р. Северная Двина (пост Тотьма и Каликино на

реке Сухона, пост Гаврино на слиянии рек Юг и Луза), и данных о температуре с метеопостов (основной из них расположен в г. Великий Устюг). Перечисленные гидропосты были выбраны в связи с тем, что на участке между городами Великий Устюг и Котлас достаточно часто образуются ледовые заторы, что является причиной затопления г. Великий Устюг, который расположен на слиянии рек Сухона и Юг [12].

В соответствии с задачами эксперимента, в ходе исследований необходимо было подтвердить возможность практической реализации автоматизации функционирования РСКМ при использовании полимодельного подхода, а также провести апробацию функционирования ПК РСКМ речных наводнений в различных режимах.

Рассмотрим последовательно выполнение этих задач.

Полимодельный подход реализован в рассматриваемой РСКМ как на этапах гидрологического (при определении характеристик стока на водосборе), так и гидродинамического (при определении характеристик движения воды по руслу) прогнозирования. Общая схема реализуемого системой полимодельного подхода представлена на рисунке 4.2.

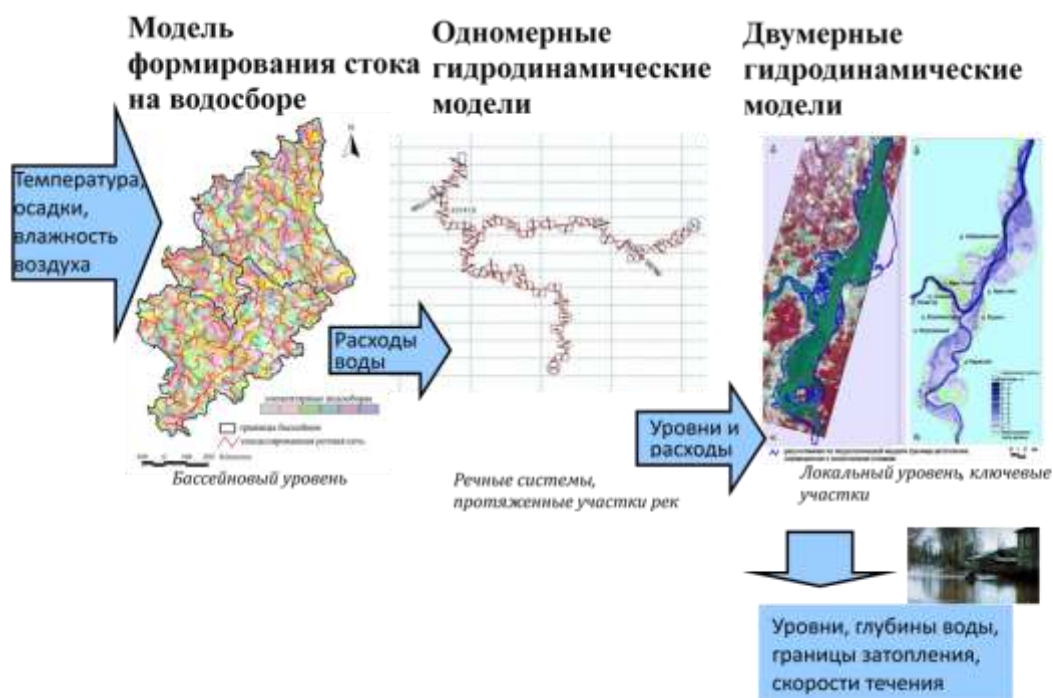


Рисунок 4.2 – Схема системы моделей для прогнозирования наводнений в бассейне р. Северная Двина (автор – Алабян А.М.)

На этапе гидрологического моделирования, как указано выше, для расчетов использовались модели ИНС и ЕСОМАГ.

Результаты прогнозирования уровня воды в районах расположения 3-х гидропостов за период с 09.03.2018 по 29.04.2018 с применением ИНС показаны на рисунках 4.3-4.5. Согласно представленным графикам, наименьшей точностью характеризуется прогноз, полученный для поста Каликино: в связи с ледовым затором, образовавшимся в период ледохода 2018 года, на данном участке сформировались аномальные условия.

Для постов Гаврино и Тотьма реальные и спрогнозированные уровни отличаются не более чем на 10% - более высокая точность прогноза для этих постов обусловлена близкими к среднестатистическим параметрами ледохода на этом участке.

На рисунке 4.6 сопоставлены результаты прогнозирования уровня воды, выполненного с применением ПК ЕСОМАГ путем упреждающего имитационного моделирования и ИНС.

На основе результатов анализа полученных прогнозов можно сделать вывод о том, что имитационная модель характеризуется более медленной реакцией на изменения паводковой ситуации, но при этом более корректной реакцией на нештатные ситуации и более высокой точностью определения трендов развития таких ситуаций в долгосрочной перспективе.

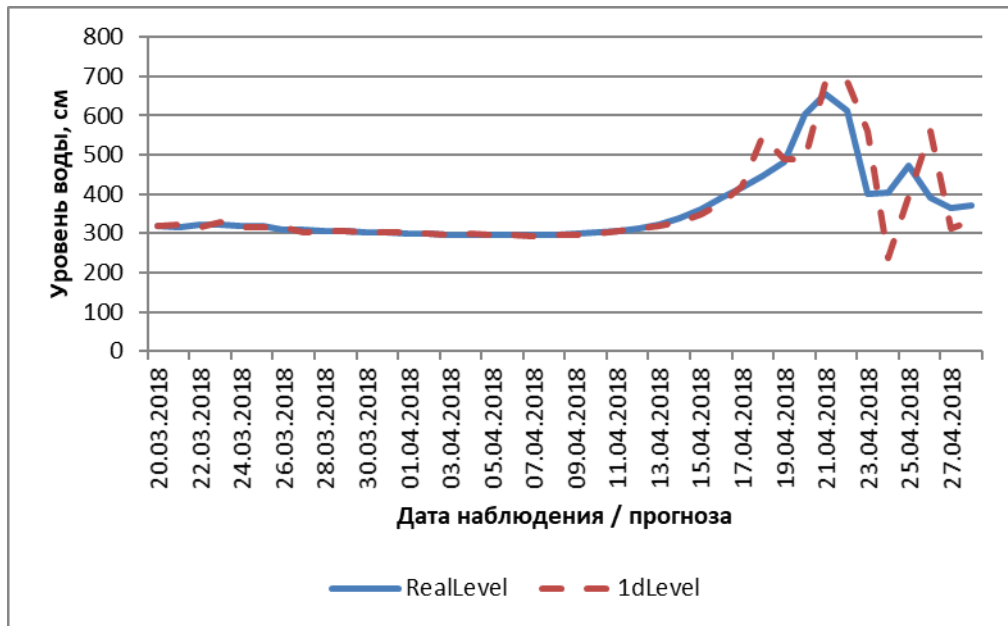


Рисунок 4.3 – Результаты прогнозирования уровня воды с использованием ИНС для поста Каликино

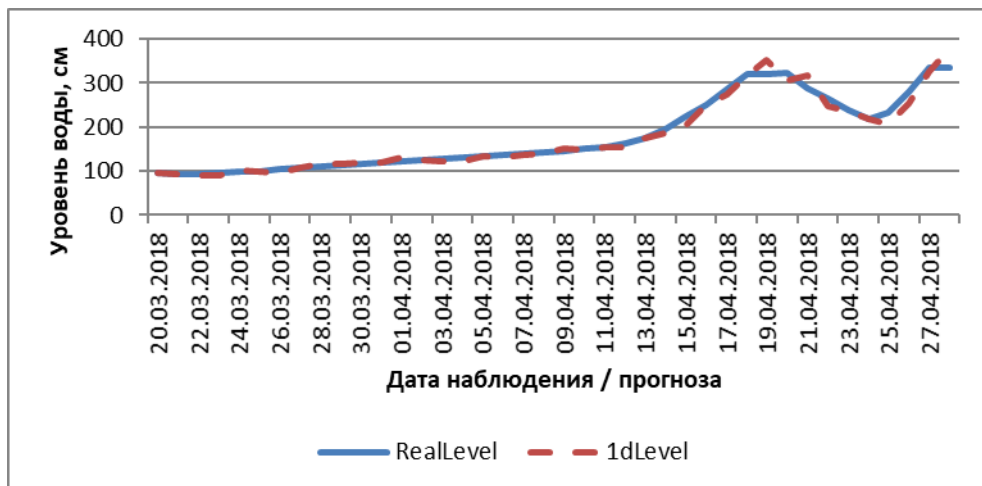


Рисунок 4.4 – Результаты прогнозирования уровня воды с использованием ИНС для поста Гаврино



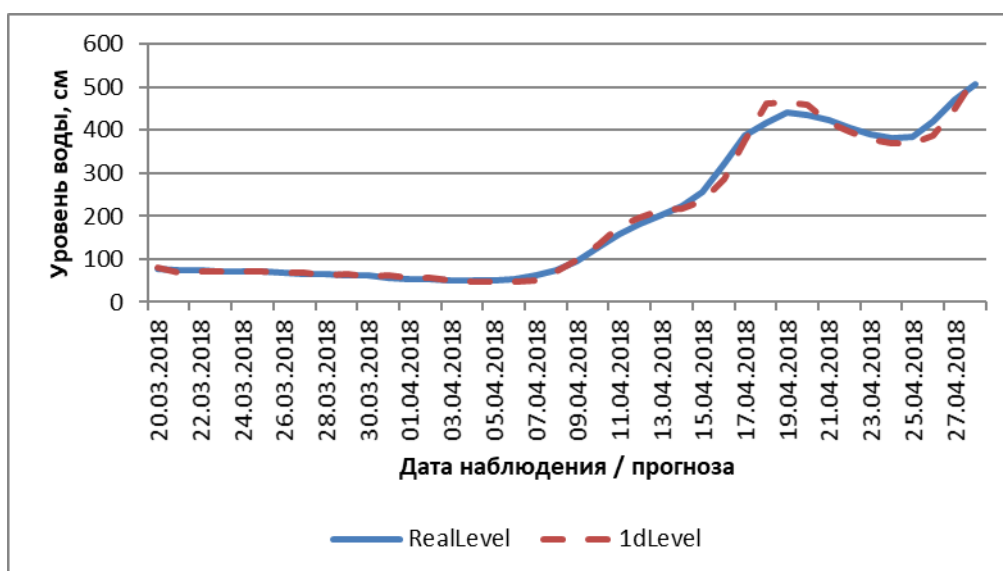


Рисунок 4.5 – Результаты прогнозирования уровня воды с использованием ИНС для поста Тотма

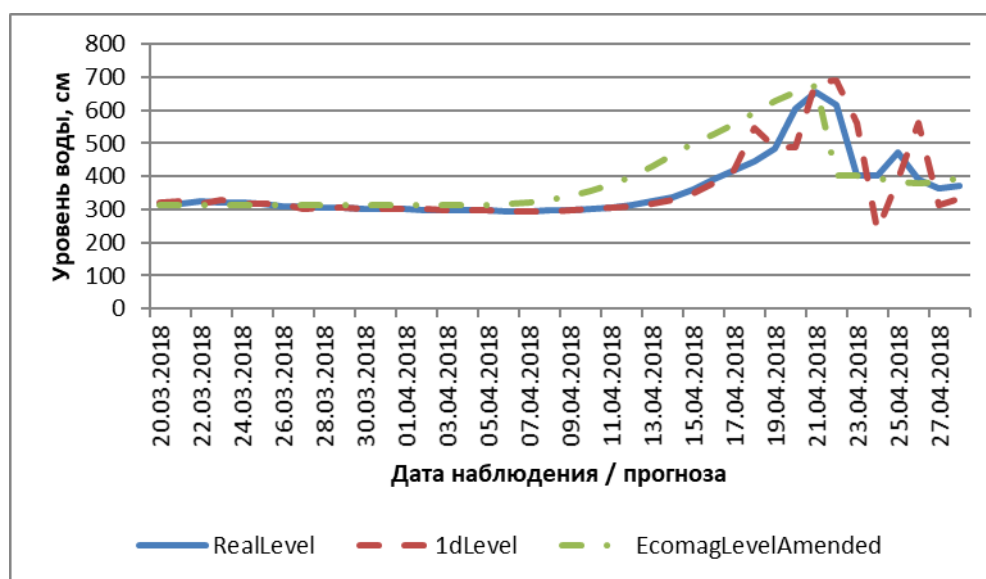


Рисунок 4.6 – Сравнение результатов прогнозирования для поста Каликино

На основе результатов анализа полученных прогнозов можно сделать следующие выводы:

- имитационная модель характеризуется более медленной реакцией на изменения паводковой ситуации, но при этом более корректной реакцией на нештатные ситуации и более высокой точностью определения трендов развития таких ситуаций в долгосрочной перспективе;

– ИНС показали эффективность в режиме «стандартного» (нормального, обычного) ледохода и способность высокоточного прогнозирования длительных по времени и инерционных изменений, влияющих на уровень воды;

– для ИНС характерна высокая погрешность при прогнозировании резких изменений в аномальных ситуациях вследствие отсутствия достаточного количества данных для их обучения и учёта всех возможных аномальных ситуаций (включая обусловленные особенностями периода замерзания реки), а также использования в ИНС исключительно оперативных данных, что приводит к невозможности учета влияния долгосрочных факторов;

– модель ECOMAG, в отличие от ИНС, обеспечивает прогнозирование возможных долгосрочных аномальных ситуаций, но при этом её необходимо адаптировать для каждой конкретной ситуации, что ведёт к снижению оперативности выполнения прогнозирования.

Результаты этой части экспериментальных исследований подтвердили необходимость комплексного использования различных моделей для повышения точности прогнозирования значений уровней воды, необходимых для последующих расчетов зон и глубин затоплений, и наличие показателей качества, которые позволяют осуществлять переход от одной модели к другой (от одного сервиса к другому) в процессе функционирования РКСМН в соответствии с алгоритмом, приведенном в разделе 3.

Аналогично производится переход от одномерных гидрологических моделей к двумерным, и обратно, на основе сравнения указанных в разделе 3 количественных характеристик результатов работы моделей.

Решение третьей задачи экспериментальных исследований – *апробации функционирования РКМ речных наводнений в различных режимах*, выполняется путем реализации работы системы в оперативном режиме (прогнозирование практически в реальном масштабе времени), в сценарном режиме, и в режиме поддержки принятия решений. Причем в каждом из

режимов достигается максимальная, вплоть до полной, автоматизация работы РСКМН.

Основным и наиболее сложным является *режим оперативного моделирования*. Он реализован следующим образом.

Первым этапом работы РСКМ является загрузка гидро- и метеоданных. В системе предусмотрена возможность получения данных с гидропостов любого типа – от ручного ввода значений через веб-интерфейс, до получения данных в виде кода КН-15 различными каналами передачи данных. При работе в полностью автоматическом режиме использовался именно код КН-15, регулярно присылаемый по электронной почте. Метеорологическая информация поступала с различных сайтов, основные данные – от системы Openweathermap.org. Интеграция разнородных источников данных производилась с использованием инструментов сервисной шины, а именно с помощью адаптеров. Набор разработанных адаптеров принимал на вход различные форматы, преобразовывал их к единому формату на выходе – универсальному сообщению. Далее, сообщение направлялось в точку сбора данных и полученное значение сохранялось в битемпоральную базу данных. То есть, записывалось само значение параметра, время, на которое это значение применимо, а также фиксировалось время приёма сообщения. Например, для прогнозного значения температуры воздуха на следующий час запись состояла из трёх полей:

- значение параметра: 22;
- время актуальности: 16:00 18.04.2018;
- время фиксации: 15:00 18:04:2018.

Для некоторых источников данных требовалась дополнительная обработка данных по пути следования сообщения. Примеры: преобразование градусов Фаренгейта в градусы Цельсия, нормирования нулевой точки отсчёта уровня воды. Такие преобразования также выполняются методами сервисной шины – медиаторами.

На втором этапе происходит оценивание исходных данных для получения представления о текущем состоянии наблюдаемого объекта. РСКМ определяет значения и динамику изменения температуры воздуха и уровней на гидропостах. Используя продукционные правила и заранее заданные таблицы происходит автоматическое формирование коэффициентов важности показателей качества (формула (2.3) в п. 2.2):  $\rho_1$  – точности моделирования,  $\rho_2$  – стоимости моделирования,  $\rho_3$  – оперативности реализации алгоритма. Упрощённо идея формирования коэффициентов по виду исходных данных заключается в следующем. При отсутствии динамики параметров и их низком значении целесообразно перейти в режим экономии ресурсов и снизить стоимость проведения моделирования. Оперативность и точность результатов не требуется. При высокой динамике параметров на первый план выходит оперативность моделирования. Требования к точности не высокие, так как ситуация стремительно меняется. На высоких уровнях воды и их низкой динамике требования к оперативности получения результата снижаются, а вместо этого требуется высокая точность для принятия более обоснованных решений по управлению территорией.

Вместе с этим происходит обнаружение ледовых заторов. При необходимости выполняется преобразование рельефной сетки для повышения адекватности моделирования.

После автоматического оценивания обстановки и выбора предпочтений решается задача синтеза функциональной структуры РСКМН. Для каждого наименования операции из реестра сервисов выбирается фактическая конечная точка некоторого сервиса-исполнителя. Подробно этот механизм изложен в параграфе. 2.2. Синтезируется файл ВРМН и передаётся на исполнение в сервисную шину, имеющую соответствующий интерпретатор.

Третий этап выполняется в соответствии с синтезированным ВРМН файлом: происходит моделирование гидрологических и гидродинамических процессов. В результате проведения моделирования формируется массив выходных файлов, происходит их интерпретация по технологии, описанной в

п. 3.2.5, и запись в битемпоральное хранилище данных. После построения контуров затопления параллельно выполняются две операции: расчёт зон пересечения с объектами инфраструктуры с формированием соответствующего слоя геоданных, а также операция оценивания адекватности моделирования и адаптации используемой гидродинамической модели (при наличии технической возможности). Адаптация происходит согласно алгоритму, подробно описанному в п. 3.2.1.

Четвёртый, заключительный, этап включает в себя операции распространения результатов моделирования с использованием технологий веб-картографии. Основной способ распространения – через геопортал. Также была настроена интеграция с системой email и SMS оповещений.

На этом цикл моделирования завершается. Следующий цикл выполняется через час после начала предыдущего цикла.

В веб-интерфейсе РСКМН моделируемые контуры зон распространения воды визуализируются совместно с данными о составе гидропостов, с которых в автоматическом режиме осуществляется загрузка данных в систему, а также графиками изменения уровней воды на гидропостах за выбранный временной промежуток (при этом используется произвольная комбинация гидропостов) и результатами прогнозов уровней по ним (рисунок 4.7).

В веб-интерфейс РСКМН также выводятся результаты обработки данных ДЗЗ из космоса. В ходе тестирования системы были использованы космические снимки с отечественных спутников Ресурс-П и Канопус-В и зарубежных КА Sentinel-1 и Sentinel-2 (Европейское космическое агентство) и RADARSAT-2 (Канада). Для того, чтобы выделить затопленные территории, материалы оптической и радарной съёмки из космоса были автоматически обработаны в соответствии с представленным в параграфе 2.4 алгоритмом. В результате, только за период с 01.04.2018 по 16.05.2018 в РСКМН было загружено более 20 оптических и радиолокационных изображений. Пример визуализации материалов космической съёмки в интерфейсе РСКМН представлен на рисунке 4.8.

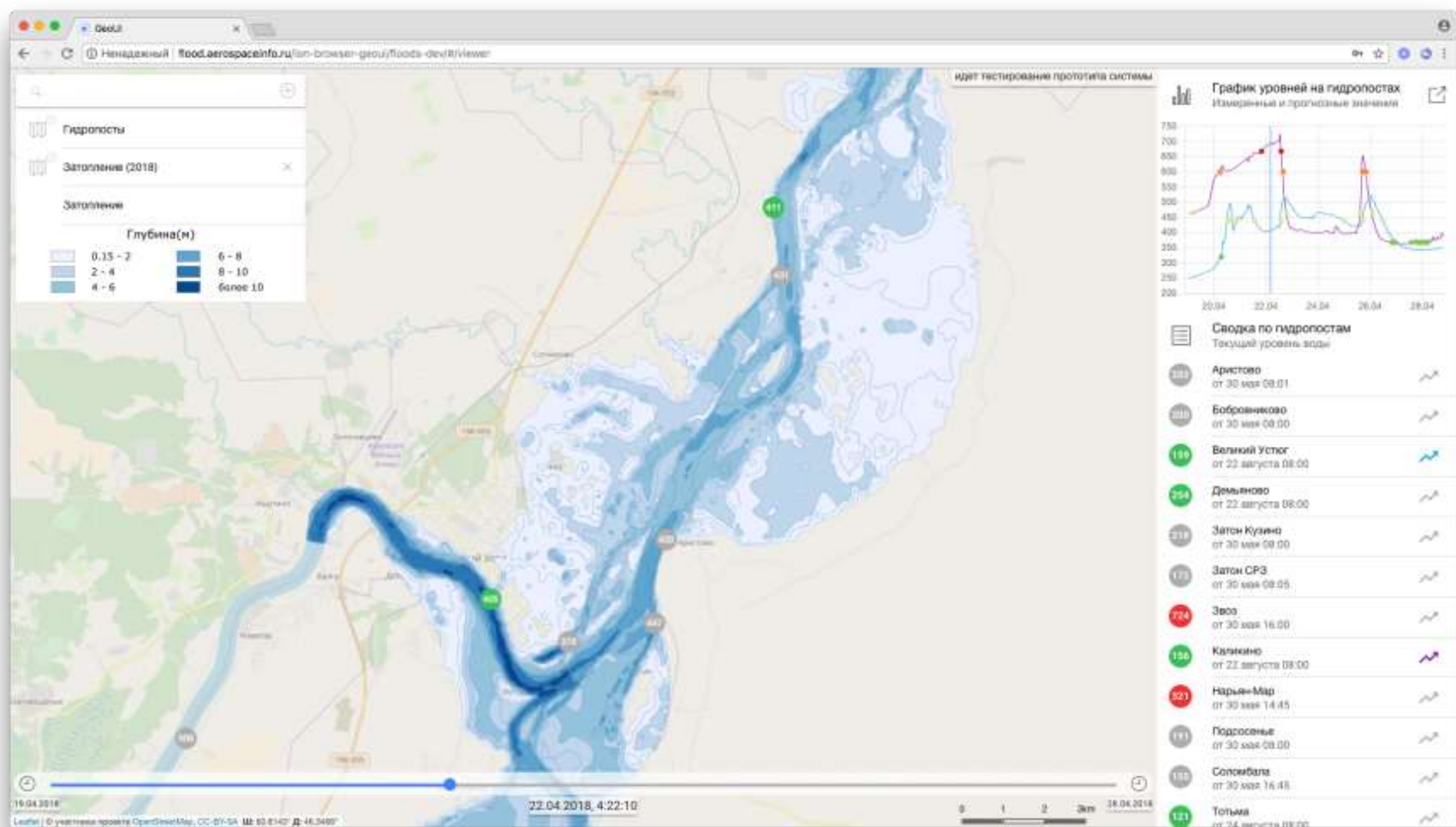
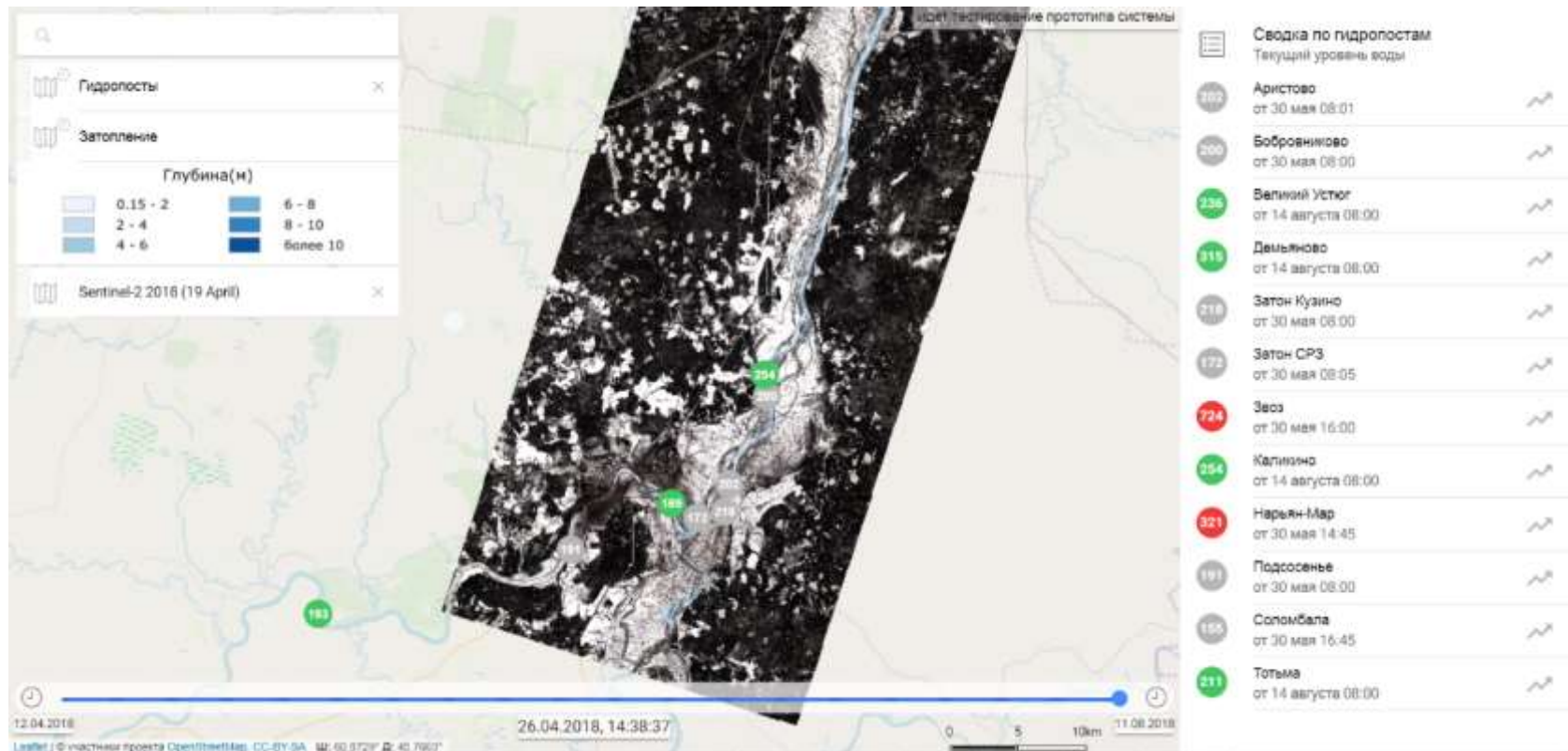
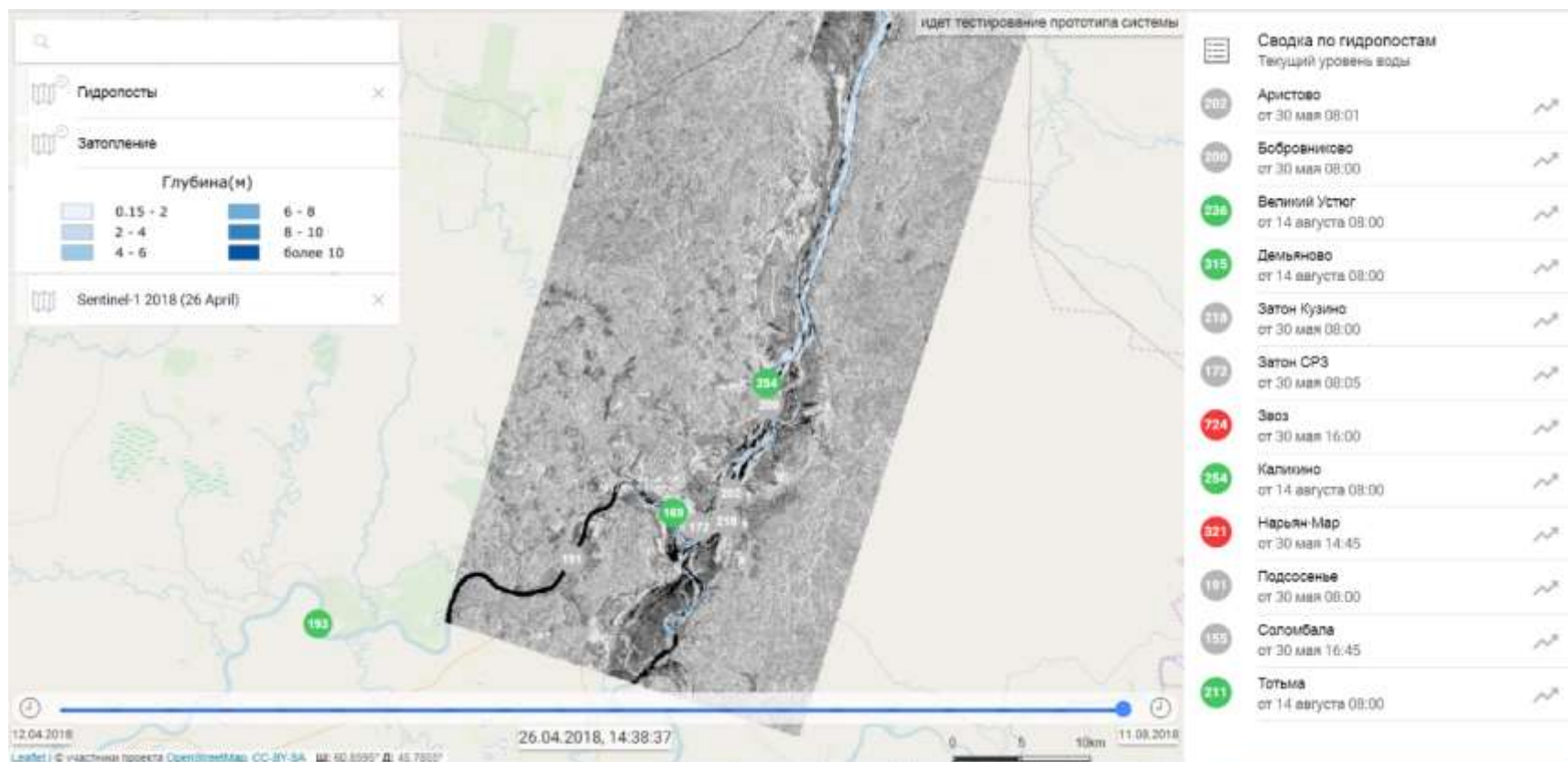


Рисунок 4.7 – Вид интерфейса РСКМН



a)



б)

Рисунок 4.8 – Вид интерфейса РСКМН с оптическим (а) и радарным (б) космическими снимками



Данные ДЗЗ из космоса были использованы в первую очередь для оценки качества моделирования наводнений, но они также позволили получить дополнительные данные о ледовых явлениях, в том числе – уникальную информацию о специфических явлениях, возникших вследствие особенностей местных условий. Примером является так называемая «Коряжемская полынья» (рисунок 4.9), образуемая вследствие сброса теплой воды Котласским ЦБК в г. Коряжма и существенно влияющая на гидрологическую обстановку на р. Северная Двина (особенно в части русла ниже по течению), что обуславливает необходимость её учёта при анализе и прогнозировании гидрологических явлений.

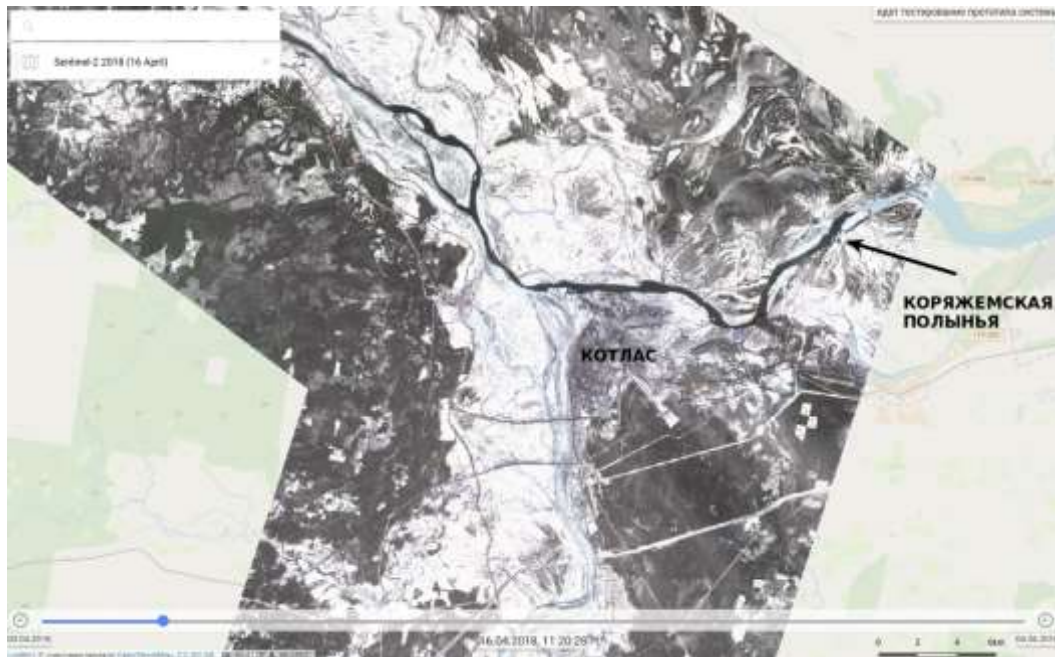


Рисунок 4.9 – Распространение Коряжемской полыньи

Заключительным этапом оперативного моделирования является сравнение результатов прогноза с фактическими границами зон затоплений, полученных в результате обработки материалов космической съемки.

Верификация результатов моделирования и валидация работы ПК выполняется с использованием сетки контрольных точек (соответствующий алгоритм, описан в параграфе 2.5), и алгоритма совместного использования оптических и радарных ДДЗЗ, описанного в параграфе 2.4.

Как было сказано ранее, в качестве одного из источников ДДЗ использовались данные с КА RADARSAT-2 и Sentinel-2, результаты обработки которых в соответствии с алгоритмом из параграфа 2.4 представлены на рисунках 4.10-4.11.

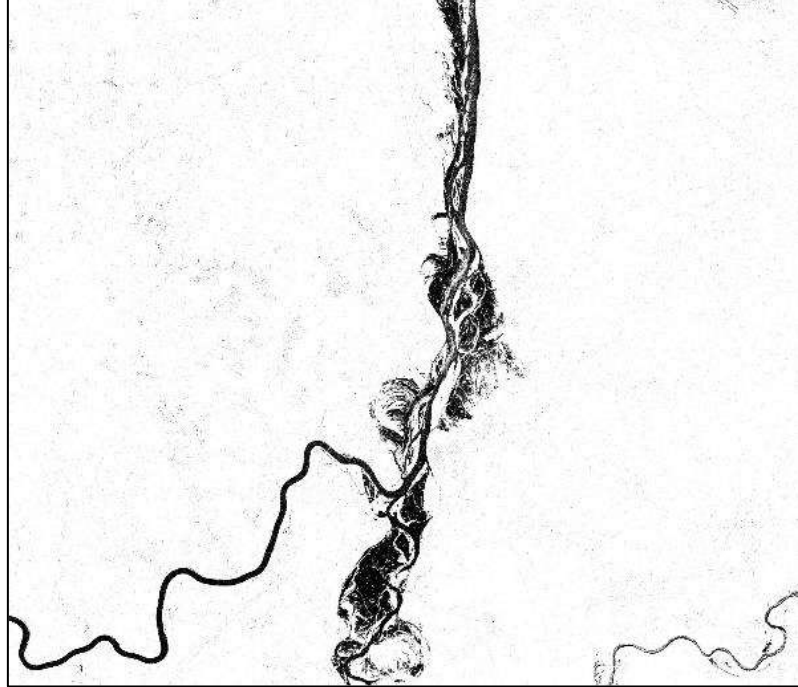


Рисунок 4.10 – Зона затопления, выявленная по данным RADARSAT-2

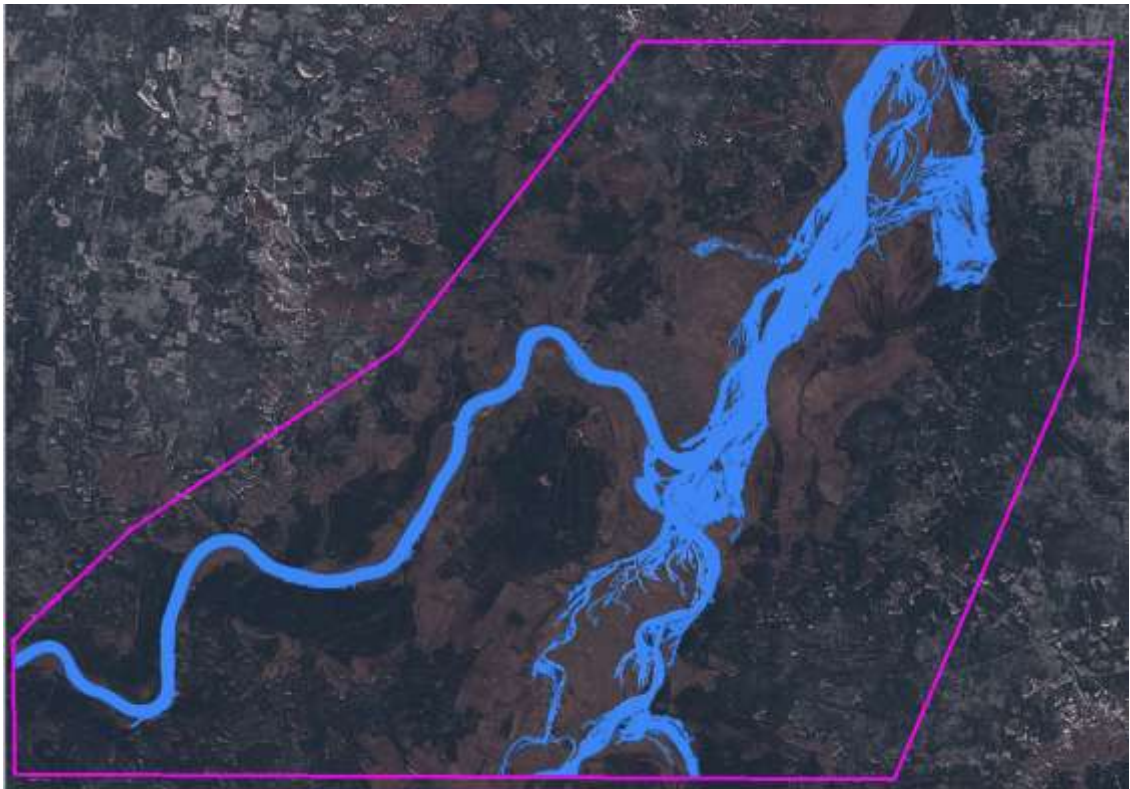


Рисунок 4.11 – Зона затопления, выявленная по данным Sentinel-2

Сопоставление зон затоплений, выявленных по результатам обработки оптических и радиолокационных космических снимков и моделирования, приведены на рисунке 4.12.

С учётом пространственного разрешения космических данных и возможных погрешностях вследствие примененного алгоритма их обработки, сравнительный анализ полученных данных показал, что смоделированные и фактические области затоплений имеют высокую сходимость на открытых участках без застройки. С наибольшей достоверностью детектируются открытые области затопления площадью более 24 м<sup>2</sup>. Несовпадение количества затопленных инфраструктурных объектов тестовой выборки между описанными подходами находилось в пределах 2-17%, что обусловлена множеством факторов, оценивание которых является предметом дальнейших исследований [12, 81, 115, 116, 125].

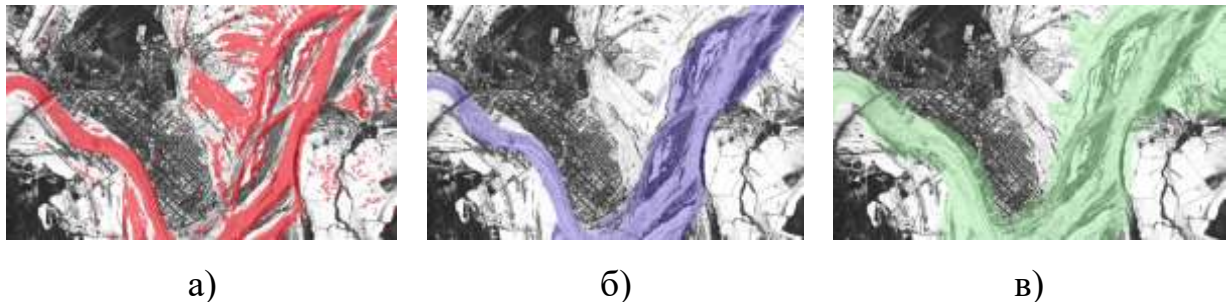


Рисунок 4.12 – Сопоставление результатов обработки радиолокационных (а) и оптических (б) данных и модельных расчётов (в)

*Режим сценарного моделирования* используется в случаях:

- 1) проверки точности моделирования на исторических исходных данных;
- 2) необходимости заранее проанализировать ситуации, которые могут возникнуть в случае тех или других сочетаний неблагоприятных факторов, вызывающих наводнения – например, при возникновении ледовых заторов, после сильных ливней, резкого повышения температуры и др.

В этом случае на вход РСКМ подаются исторические или вновь сформированные данные о значениях уровней и расходов воды на гидропостах, метеоданные, и др. Разработанный ПК обеспечивает

синхронизацию ввода данных, расчет, выбор наиболее адекватных в смысле критериев, приведенных в разделе 3, моделей, и т.д.

В ходе эксперимента осуществлялся просчет различных сценариев.

В качестве примера на рисунке 4.13 приведен скриншот сценария наводнения 2016 г., рассчитанный по историческим данным с гидростов.

На рисунке 4.14 показан искусственно смоделированный сценарий наводнения, который потенциально мог возникнуть в 2018 г. в случае возникновения ледового затора в районе г. Котлас. Этот расчет выполнен в процессе проведения эксперимента по заявке Агентства государственной противопожарной службы и гражданской защиты г. Архангельска, в ведении которого находятся вопросы мониторинга ЧС и обеспечения безопасности населения.

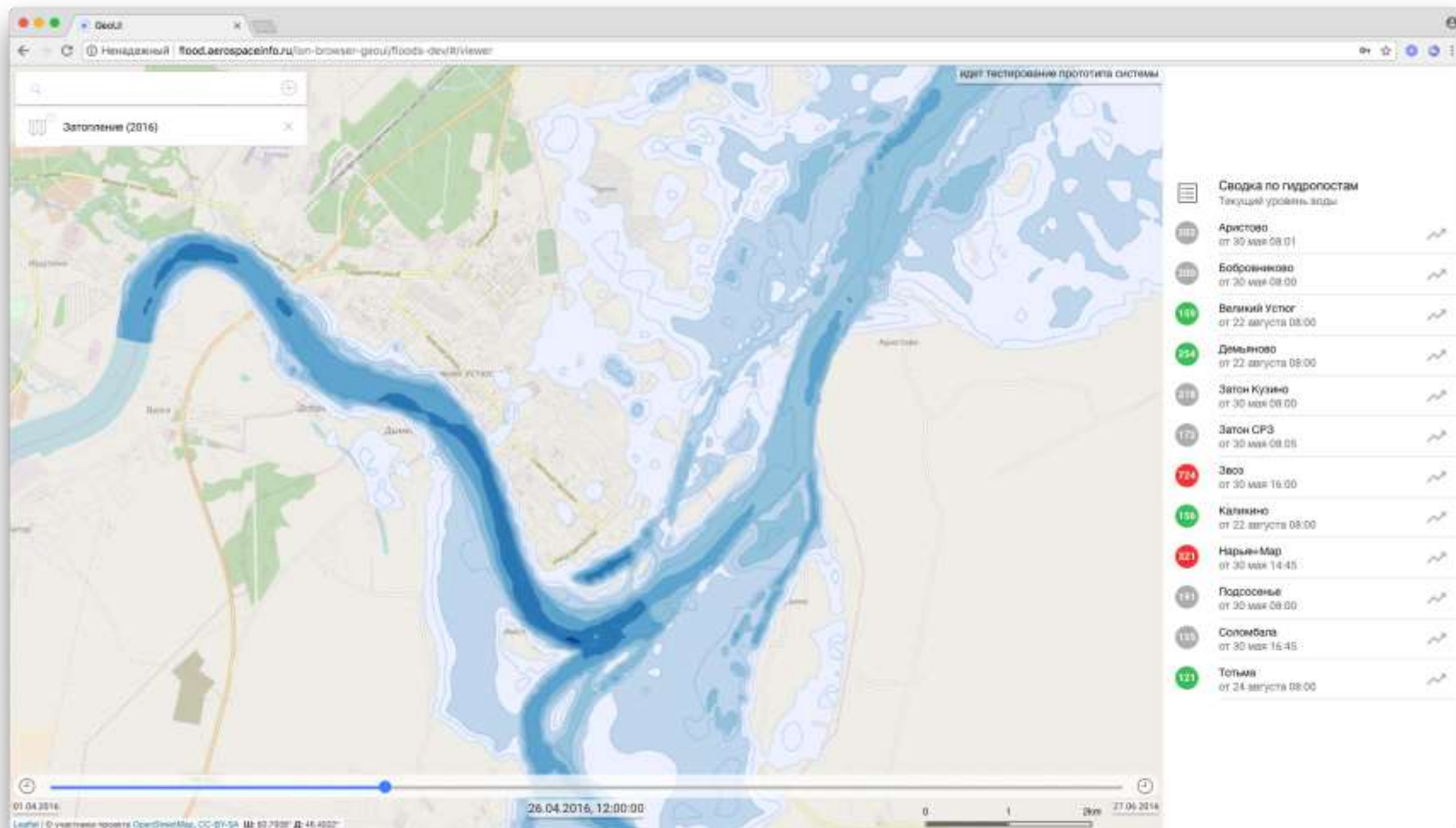


Рисунок 4.13 – Вид интерфейса РСКМ при моделировании наводнения 2016 г.

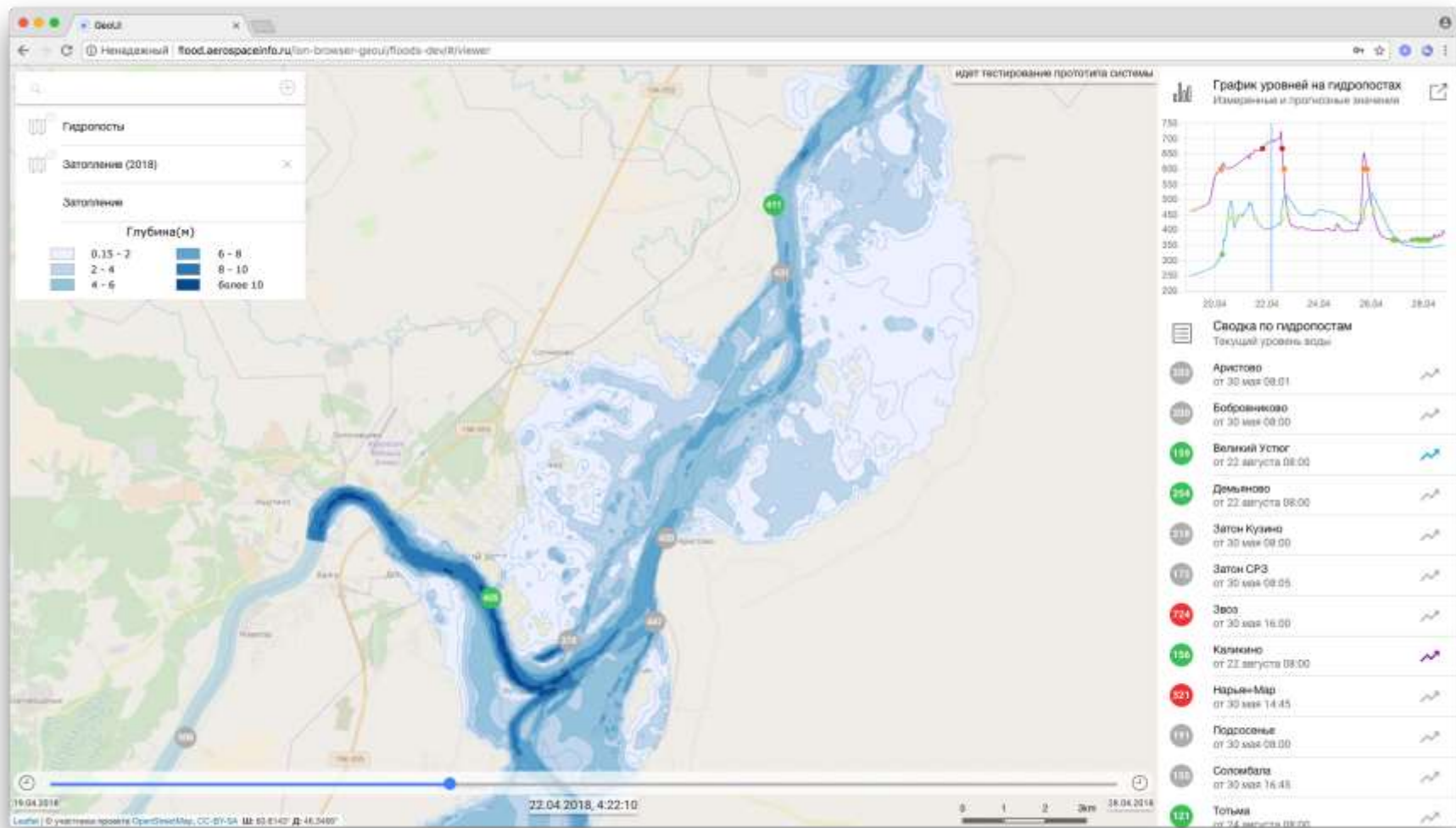


Рисунок 4.14 – Вид интерфейса РСКМ при моделировании наводнения 2018 г. в случае возникновения ледового затора

Результаты сценарных расчетов показали работоспособность созданных программных средств, высокий уровень совпадения модельных расчетов с реальными данными по затопленным участкам территорий, и, благодаря дружественному наглядному интерфейсу, высокую востребованность данного режима работы не только у специалистов – гидрологов, но и у служб МЧС.

*Режим поддержки принятия решений* предназначен для оценивания потенциального ущерба от наводнений, который может быть нанесен объектам инфраструктуры при их попадании в зону затопления. Эти объекты определяются за счет анализа пересечения слоя с пространственными данными об инфраструктуре и слоя с прогнозными контурами зоны затопления на интересующий пользователя момент времени. Скриншот интерфейса пользователя с примером реализации данного режима приведен на рисунке 4.15.

На рисунке красным цветом выделены здания и сооружения, которые потенциально могут попасть в зону затопления в момент времени, на который выполняется моделирование.

Кроме того, были проведены эксперименты по автоматизации формирования отчетов о рисках и оценке ущерба согласно ГОСТ Р 22.8.09-2014 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Требования к расчету уровня безопасности, риска и ущерба от подтопления градопромышленных территорий» [159] и ряду методик и руководящих документов.

В режиме поддержки принятия решений также осуществлялся анализ точности моделирования на основе сравнения количества объектов инфраструктуры, попадающих в зону затоплений, рассчитанных по результатам расчетов, и количества объектов, фактически подтопленных. Совпадение по числу таких объектов составляло не менее 90-95% [160].

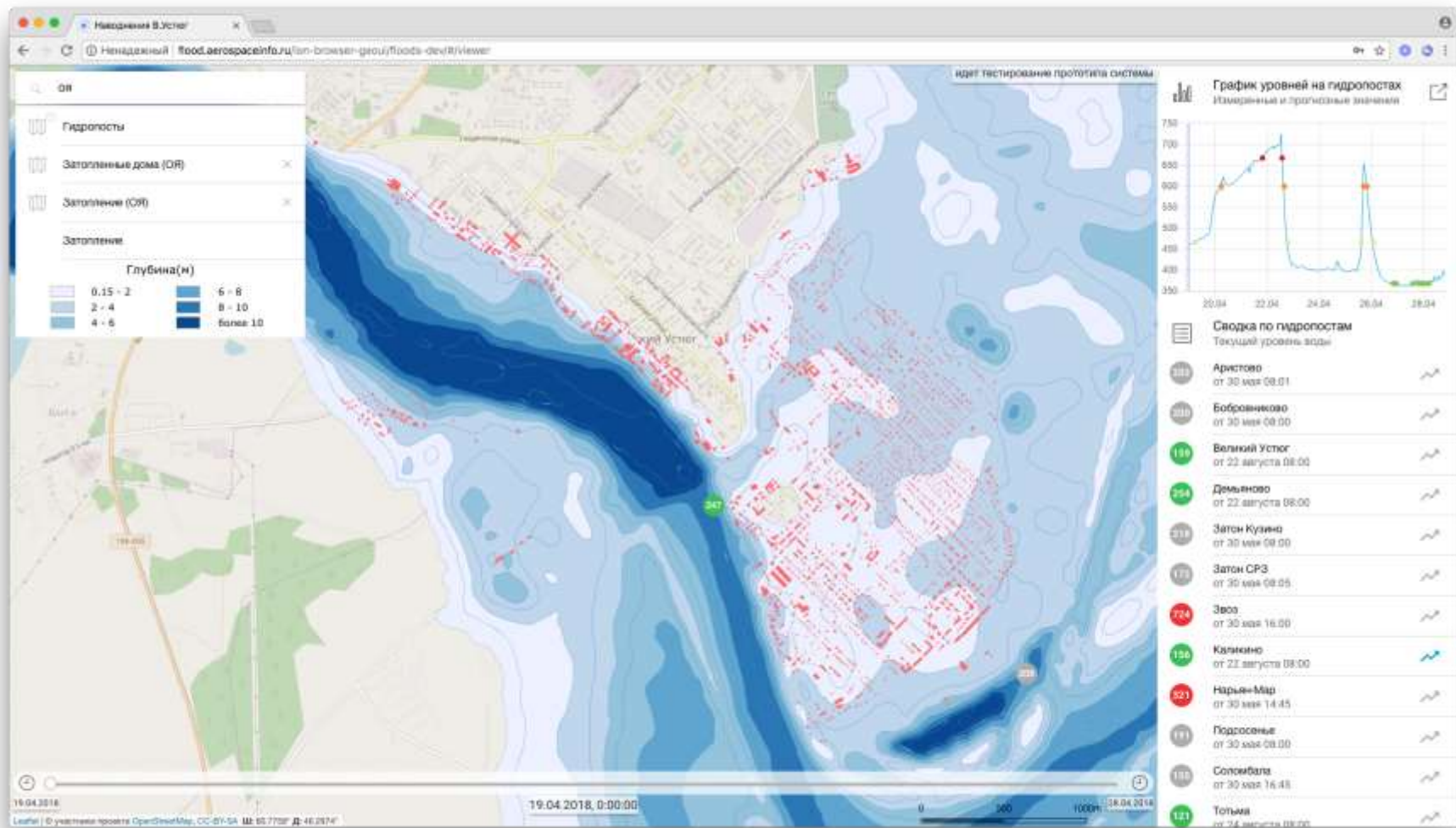


Рисунок 4.15 – Вид интерфейса РСКМ в режиме поддержки принятия решений



В целом, результаты апробации ПК показали, что комплексное моделирование (в сравнении с автономным использованием отдельных моделей) обеспечивает более высокую точность по всему диапазону уровней расхода воды – от межевых уровней до уровней паводков 1% обеспеченности. На рисунке 4.16 схематично на качественном уровне представлено пояснение к данному методу оценивания эффективности применения предлагаемой РСКМ. Точность прогноза при функционировании ПК, оцениваемая методом контрольных точек, описанном в п. 3.3, составляет не менее 92%.

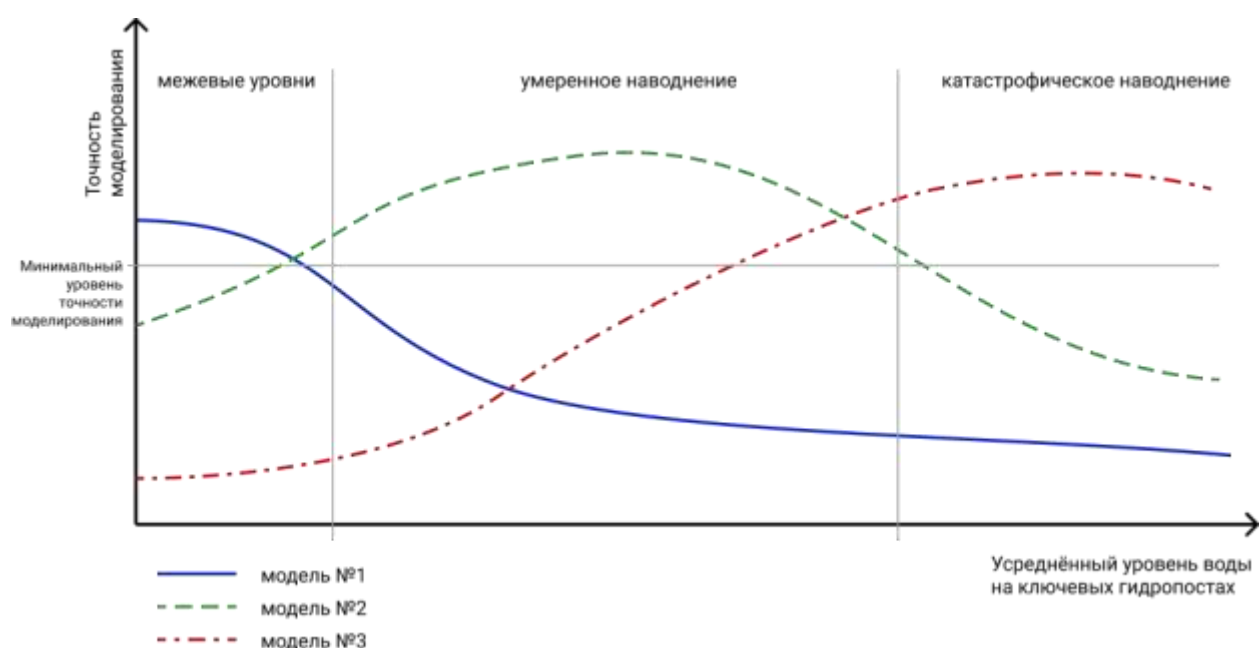


Рисунок 4.16 – Схематичное представление зависимости адекватности моделей от складывающейся обстановки

В целом, экспериментальные исследования показали, что разработанная РСКМ представляет собой полностью автоматический программный комплекс непрерывного действия, обеспечивающий регулярное выполнение всех операций цикла моделирования, к которым относятся:

1. Загрузка данных с гидропостов в формате КН-15, загрузка метеоданных в формате КН-01 и других частных форматах, предобработка загруженных гидрометеорологических данных и размещение их в едином формате в базе данных.

2. Обеспечение пула моделей требуемыми исходными данными. Реализуется в разработанном модуле обмена данными между гидрометеорологическими моделями различных типов.

3. Определение моделирующего сервиса, предоставляющего наиболее точные результаты в складывающейся обстановке, и параметрическая адаптация выбранной модели.

4. Осуществление контроля проведения расчетов, выгрузка результатов и их интерпретация.

5. Публикация рассчитанных контуров и зон затоплений в формате веб-картографии для возможности отображения их в интерфейсе пользователя на стационарных и мобильных устройствах.

6. Загрузка космических снимков Sentinel, Ресурс-П и Канопус-В с использованием разработанной подсистемы оперативной загрузки данных ДЗЗ.

7. Проведение мультитременного анализа разнородных пространственных данных для выявления подвергающихся угрозе затопления объектов инфраструктуры с использованием разработанного программного модуля взаимодействия с внешними системами и модуля анализа пересечения векторных слоев зон затоплений и объектов инфраструктуры для оценивания ущербов по заданным методикам.

8. Автоматическое оповещение пользователей по доступным электронным средствам связи на основе модулей интеграции с сервисами СМС-оповещений и «чат-ботами» для мессенджеров.

9. Формирование отчетов о возможных ущербах в виде документов Word и PDF.

Достигаемая точность и оперативность моделирования при работе ПК РСКМ достаточна для решения практических задач своевременного оповещения населения в зонах потенциального затопления и снижения ущербов от наводнений.

### 4.3. Выводы по разделу 4

1. Созданный ПК РСКМ прошел 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., в том числе опытное использование в интересах исполнительных органов государственной власти Архангельской и Вологодской областей для оперативного прогнозирования весенних паводков и в ходе упреждающих действий по их ликвидации. В ходе эксперимента ПК РСКМ формировал ежечасный круглосуточный прогноз зон и глубин затоплений на 24-48 часов вперед в оперативном режиме; также реализован сценарный режим работы по формированию прогноза для заданного состава исходных данных.

2. Экспериментальные исследования показали, что за счет внедрения разработанного в диссертации алгоритмического, методического и программного обеспечения разработанный ПК обеспечивает организацию взаимодействия программных компонентов РСКМ. За счет этого реализуется принципиальная возможность автоматизации функционирования РСКМ при использовании полимодельного подхода к моделированию ППТО, в том числе применительно к задаче оперативного прогнозирования речных наводнений. Апробация функционирования РСКМН выполнена в различных режимах, включая полностью автоматическую работу на реальных исходных данных в оперативном режиме прогнозирования речных наводнений.

3. Результаты экспериментальных исследований и расчетов по разработанной методике валидации ПК 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 достигает 92%, а также существенно снижаются требования к специальной квалификации пользователей РСКМ 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 - повышение 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, включая совокупность компонентов (программных модулей), реализующий предложенные технологии интеграции разнородных данных, алгоритмы обработки спутниковых данных, формирования функциональной структуры РСКМ, интерпретации и предоставления результатов пользователям, и др., совокупность которых обеспечивает автоматизацию решения тематических задач РСКМ при использовании полимодельного подхода к описанию ППТО. Разработанный прототип ПК включает программные средства, которые обеспечивают организацию взаимодействия программных компонентов при комплексном моделировании широкого класса ППТО, в том числе при оперативном прогнозировании 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 достигает 92%, а также существенно снижаются требования к специальной квалификации пользователей РСКМ за счет автоматического режима работы системы и удобства интерфейса.

Перспективные направления продолжения исследований по рассмотренной в диссертации тематике определяются необходимостью увеличения количества разнородных моделей и привлечения все большего объема исходных данных, поступающих в реальном масштабе времени от различных источников, для повышения достоверности анализа развивающихся ситуаций, связанных с функционированием ППТО. Данные обстоятельства приводят к повышению сложности организации вычислительных процессов и снижению оперативности получения прогнозов в случае сохранения традиционного подхода к вычислениям. Для решения рассмотренных проблем необходимо проведение исследований по дальнейшему развитию методологии 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. При этом задача синтеза моделирующего комплекса для прогнозирования состояния ППТО должна ставиться и решаться одновременно с задачей управления информационными процессами в системе

комплексного автоматизированного моделирования и динамического распределения вычислительных ресурсов при моделировании.

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



**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АГК	автоматизированный гидрологический комплекс
АИУС РСЧС	автоматизированная информационно-управляющая система Единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС
АПК	аппаратно-программный комплекс
ГИС	геоинформационная система
ДДЗЗ	данные дистанционного зондирования Земли
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
ЕТРИС ДЗЗ	единая территориально-распределенная информационная система дистанционного зондирования Земли
ИНС	искусственная нейронная сеть
ИР	информационный ресурс
ИТ	информационные технологии
КА	космический аппарат
КМ	комплексное моделирование
ПК	программный комплекс
ПМК	полимодельный комплекс
ППТО	природные и природно-технические объекты
ПСр	программные средства
РСКМ	распределенная система комплексного моделирования
РСКМН	распределенная система комплексного моделирования наводнений
СКМ	система комплексного моделирования
СОА	сервис-ориентированная архитектура
СУБД	система управления базами данных
ТМД	темпоральная модель данных
ЦМР	цифровая модель данных
ЧС	чрезвычайная ситуация

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Б.В., Зеленцов В.А., Пиманов И.Ю., Юсупов Р.М. Комплексное моделирование и проактивное управление сложными объектами в условиях чрезвычайных ситуаций // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021) (Санкт-Петербург, 20-22 октября 2021): труды конференции. Санкт-Петербург, 2021. С. 65-76.
2. Sokolov B.V., Alferov V.V., Salukhov V.V., Pimanov I.Yu. Fundamentals of Complex Objects Structural Dynamics Proactive Management Theory and its Application // International Scientific Conference Mathematical methods in engineering and technology (MMET NW 2018) (St. Petersburg, September 10-14, 2018): proceedings. St. Petersburg, 2018. P.79–81.
3. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Кожанов А.Н., Пиманов И.Ю., Потрясаев С.А. Информационно-аналитическая система управления развитием территорий на базе использования данных дистанционного зондирования земли и мобильных геоинформационных технологий // Экология. Экономика. Информатика. Сборник статей, в 3 т. Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 2015. Т.3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. С. 48-59.
4. Зеленцов В.А., Кожанов А.Н., Пиманов И.Ю., Потрясаев С.А. Реализация междисциплинарных проектов на базе открытой ГИС-платформы // Международная научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения» (Санкт-Петербург, 11-13 ноября 2015 г.): сборник материалов конференции. Санкт-Петербург: Изд. «Политехника». С. 162-166.
5. Зеленцов В.А. Мониторинг и прогнозирование состояния природно-технологических объектов на базе систем с сервис-ориентированной архитектурой // Международная научно-техническая конференция «Мониторинг техногенных и природных объектов» (Минск, 30

ноября – 1 декабря 2017 г.): сборник материалов конференции. Минск: БГУИР, 2017. С. 5-11.

6. 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.

7. Фридман А.Я. Ситуационное моделирование природно-технических комплексов / А.Я. Фридман, О.В. Фридман, А.А. Зуенко. СПб: Издательство Политехнического университета, 2010. 436 с.

8. Потрясаев С.А. Комплексное моделирование сложных процессов на основе нотации BPMN // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 11. С. 913-920.

9. Программные продукты для имитационного моделирования [Электронный ресурс] // Национальное общество имитационного моделирования: [сайт]. URL: <http://simulation.su/static/ru-soft.html> (дата обращения: 10.04.2022).

10. Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Создание интеллектуальных информационных систем оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86. № 2. С. 127-137. DOI: 10.7868/S086958731602002X.

11. Новаковский Б.А., Колесникова О.Н., Прасолова А.И., Пермяков Р.В. Геоинформационное моделирование наводнений по материалам космической съёмки (на примере г. Бийск, Алтайский край) // Геоинформатика. 2015. № 1. С. 15–20.

12. 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.

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

14. Охтилев М.Ю., Павлов А.Н., Плотников А.М., Потрысаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексное моделирование сложных объектов: основные особенности и примеры практической реализации // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2015)» (21-23 октября 2015 г., Москва)): труды конференции, в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. Акад. наук; под общ. ред. С.Н. Васильева, Р.М. Юсупова. Т.1. Пленарные доклады. М.: ИПУ РАН, 2015. С.58-81.

15. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Pimanov I.J., Nemykin S.A. Creation of intelligent information flood forecasting systems based on service-oriented architecture // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. Vol. 466. Springer International Publishing Switzerland. P. 371-381. DOI: 10.1007/978-3-319-33389-2\_35.

16. Зеленцов В.А., Пиманов И.Ю., Семенов А.Е., Соколов Б.В. Интеллектуальные технологии и система оперативного прогнозирования речных наводнений // XII мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019) (Геленджик, 23-28 сентября 2019 г.): труды конференции. Том 1. Материалы докладов локальной научно-технической конференции «Модели, методы и технологии интеллектуального управления» (ИУ-2019). Таганрог: Изд-во Южного федерального университета. 2019. С. 71-73.

17. 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.* 2019. XLII-3/W8. 477–483. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-477-2019.

18. Emerton R.E., Stephens E.M., Pappenberger F., Pagano T.C., Weerts A.H., Wood A.W., Salamon P., Brown J.D., Hjerdt N., Donnelly C., Baugh C.A., Cloke H.L. Continental and global scale flood forecasting systems // *WIRES Water*, 2016. 3. 391-418. DOI: 10.1002/wat2.1137.

19. Mochalov V.F., Markov A.V., Grigorieva O.V., Zhukov D.V., Brovkina O.V., Pimanov I.Y. Remote Sensing for Environmental Monitoring. Complex Modeling // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016. Springer International Publishing Switzerland. P. 497-506. DOI: 10.1007/978-3-319-33389-2\_47.
20. Sokolov B., Micony S., Ziuban A., Burakov V., Pimanov I., Ivanov D. Theory and practice of information fusion models' quality estimation and models' quality control // 29<sup>th</sup> European Modeling and Simulation Symposium (EMSS 2017), Held at the International Multidisciplinary Modeling and Simulation Multiconference (I3M 2017) (Barcelona, September 18-20, 2017): proceedings. P. 194-203.
21. Zelentsov V. et al. River Flood Forecasting System: An Interdisciplinary Approach // Flood Monitoring through Remote Sensing / Refice A., D'Addabbo A., Capolongo D. (eds). Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, Cham, 2018.
22. Zelentsov V., Brovkina O., Pimanov I., Potryasaev S. Automatization of forest ecosystems sustainability estimation based on complex modelling and Earth observation data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 507. 2020. 012034. DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012034.
23. Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Kulakov A.Yu., Pimanov I.Yu. Models and Methods of Reconfiguration of Complex Technical Objects in Different Situation Conditions // International Scientific Conference «Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMET NW 2018)» (St. Petersburg, September 10-14, 2018): proceedings. P.361–363.
24. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А. Архитектура и примеры реализации информационной платформы для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Труды СПИИРАН. 2017. Т.6. №55. С. 86–113. DOI: 10.15622/sp.55.4.

25. Измалков В.А. АИУС РСЧС-2030: анализ опыта эксплуатации и перспективные направления развития // Технологии гражданской безопасности. 2017. Т.14. № 1 (51). С. 38-42.

26. 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.

27. Zelentsov V., Potryasaev S., Pimanov I., Mochalov V. Intellectual information platform for thematic services creation with integrated use of ERS and in-situ data // International conference «Quo vaditis agriculture, forestry and society under global change?» (Velké Karlovice, October 02-04, 2017): proceedings. P.81-85.

28. Zelentsov, V., Potryasaev, S., Pimanov I., Mochalov V. Software suite for creating downstream applications and thematic services on the base of remote sensing data processing and integrated modelling // International Geoscience and Remote Sensing Systems Symposium (IGARSS 2018) (Valencia, July 22-27, 2018): proceedings. P. 3477-3480. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519066.

29. 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.

30. 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.

31. Copernicus Emergency Management Service (CEMS): [сайт]. URL: <http://emergency.copernicus.eu/> (дата обращения: 10.04.2022).

32. Global Flood Awareness System (GloFAS): [сайт]. URL: <https://www.globalfloods.eu/> (дата обращения: 10.04.2022).

33. European Flood Awareness System (EFAS): [сайт]. URL: <https://www.efas.eu/en> (дата обращения: 10.04.2022).
34. European Forest Fire Information System (EFFIS): [сайт]. URL: <https://effis.jrc.ec.europa.eu/> (дата обращения: 10.04.2022).
35. Drought Observatory: [сайт]. URL: <https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000> (дата обращения: 10.04.2022).
36. Rapid Mapping: [сайт]. URL: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/rapid-mapping-portfolio> (дата обращения: 10.04.2022).
37. Risk & Recovery Mapping: [сайт]. URL: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/risk-and-recovery-mapping-portfolio> (дата обращения: 10.04.2022).
38. ESA Thematic Exploitation Platform (TEP): [сайт]. URL: <https://eo4society.esa.int/thematic-exploitation-platforms-overview/> (дата обращения: 10.04.2022).
39. Geohazards TEP: [сайт]. URL: <https://geohazards-tep.eu> (дата обращения: 10.04.2022).
40. Hydrology TEP: [сайт]. URL: <https://hydrology-tep.eu/> (дата обращения: 10.04.2022).
41. Flood Monitoring Service: [сайт]. URL: <https://hydrology-tep.eu/guest/service/flood-monitoring/> (дата обращения: 10.04.2022).
42. NASA Disasters Mapping Portal: [сайт]. URL: <https://maps.disasters.nasa.gov/> (дата обращения: 10.04.2022).
43. Fire Information for Resource Management System (FIRMS). URL: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms> (дата обращения: 10.04.2022).
44. Карта пожаров: [сайт]. URL: <https://fires.ru/> (дата обращения: 10.04.2022).

45. ВЕГА-Science: [сайт]. URL: <http://sci-vega.ru/> (дата обращения: 10.04.2022).
46. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства («ИСДМ-Рослесхоз»): [сайт]. URL: [https://pushkino.aviales.ru/main\\_pages/index.shtml](https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml) (дата обращения: 10.04.2022).
47. ГИС «Каскад»: [сайт]. URL: <http://kaskad.ukmmchs.ru/> (дата обращения: 10.04.2022).
48. Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»: [сайт]. URL: [http://planet.iitp.ru/index.php?page\\_type=main&page=about](http://planet.iitp.ru/index.php?page_type=main&page=about) (дата обращения: 10.04.2022).
49. Единая территориально-распределенная информационная система дистанционного зондирования Земли (ЕТРИС ДЗЗ): [сайт]. URL: [http://www.ntsomz.ru/ks\\_dzz/nkpoi/etris\\_20200317](http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/nkpoi/etris_20200317) (дата обращения: 10.04.2022).
50. АПК «Безопасный город»: [сайт]. URL: <https://apkgb.info/> (дата обращения: 10.04.2022).
51. Hydrological Predictions for the Environment Model (HYPE): [сайт]. URL: <https://hypeweb.smhi.se/> (дата обращения: 10.04.2022).
52. National Oceanic and Atmospheric Administration's National Weather Service: [сайт]. URL: <https://water.weather.gov/ahps/> (дата обращения: 10.04.2022).
53. Flood Forecasting and Warning Service: [сайт]. URL: <http://www.bom.gov.au/water/floods/index.shtml> (дата обращения: 10.04.2022).
54. Романов А.В. Развитие системы прогнозирования наводнений в Российской Федерации. Часть I. Фон и катализаторы изменений // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 182-195.
55. Казаков Э.Э., Журавлёв С.А., Курочкина Л.С., Айзель Г.В. Аналитический геоинформационный веб-сервис о прошлом и будущем гидрологического режима и климата на территории Северо-Запада России //



Международная научная конференция памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению» (Санкт-Петербург, 7–9 декабря 2020 г.): сборник докладов конференции. Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург, 2020. С. 659-664.

56. Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkina L., Moreydo V. OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia // Water 2019. 11. 1546. DOI: 10.3390/w11081546.

57. OpenForecast: [сайт]. URL: <https://openforecast.github.io/> (дата обращения: 10.04.2022).

58. OpenLevels: [сайт]. URL: <https://openlevels.github.io/map.html> (дата обращения: 10.04.2022).

59. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. № 356. С. 1-247.

60. Фролов А.В., Асмус В.В., Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Жабина И.И., Затыгалова В.В., Кровотынцев В.А., Кудрявцева О.И., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Степанов Ю.А. «ГИС АМУР»: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 5-21.

61. Система автоматизированной системы мониторинга, прогнозирования и анализа гидрологических рисков «Паводок 2.0»: [сайт]. URL: <http://portal.introgis.com/CoGIS/FloodRB#> (дата обращения: 10.04.2022).

62. Автоматизированная система мониторинга паводковой ситуации на территории Краснодарского края [Электронный ресурс] // Emercit: [сайт]. URL: <http://www.emercit.ru/main/projects/9.php> (дата обращения: 10.04.2022).

63. Мониторинг весеннего половодья в бассейне Камы: [сайт]. URL: <http://hydromonitor.maps.psu.ru/> (дата обращения: 10.04.2022).

64. Бугаец А. Н., Мотовилов Ю. Г., Беликов В. В. и др. Построение интегрированной системы гидрологического моделирования с применением стандарта OpenMI для задач управления риском наводнений (на примере среднего Амура) // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.», Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 12-20.

65. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Кожанов А.Н., Пиманов И.Ю., Потрясаев С.А., Скобцов В.Ю. Интеграция подсистем и сервисов доступа к результатам космического мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций // XIV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2014)» (Санкт-Петербург, 29-31 октября 2014 г.): материалы конференции. СПОИСУ. СПб, 2015. С.39-43.

66. Бугаец А.Н., Гончуков Л.В. Практические примеры использования стандарта OpenMI для создания интегрированных систем гидрологического моделирования // Международная научно-практическая конференция, памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова «Вторые Виноградовские Чтения. Искусство гидрологии» (Санкт-Петербург, 18-22 ноября 2015 г.): материалы конференции. СПб, 2015. С. 271-276.

67. Советов Б.Я., Водяхо А.И., Дубенецкий В.А., Цехановский В.В. Архитектура информационных систем. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 288 с.

68. Paik H., Lemos A., Barukh M., Benatallah B., Natarajan A. Web Service Implementation and Composition Techniques. Springer International Publishing, 2017. 256 p.

69. Дмитриев А. Сервис-ориентированная архитектура в современных моделях бизнеса. М.: ДК, 2006. 221 с.

70. 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.

71. Пиманов И.Ю. Представление результатов прогнозирования наводнений средствами информационно-аналитической системы с сервис-ориентированной архитектурой // 9-я конференция «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016)» (Санкт-Петербург, 04-06 октября 2016 г.): материалы конференции. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С.431-434.

72. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Пиманов И.Ю., Потрясаев С.А., Семенов А.Е. Информационная платформа для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Седьмой белорусский космический конгресс (Минск, 24-26 октября 2017 г.): материалы. Т.2. С.242-245.

73. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Автоматизация мониторинга и комплексного моделирования гидрологической обстановки в бассейнах рек // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. 55. С. 74-85. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-55-74-85.

74. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Семенов А.Е. Принципы построения и примеры реализации информационной системы принятия управленческих решений обеспечения экологической безопасности сельскохозяйственного производства // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 1(98). С. 6-17. DOI: 10.24411/0131-5226-2019-10117.

75. 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. 2020. 509. 012061. DOI: 10.1088/1755-1315/509/1/012061.

76. 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. 2021. 806. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012002.

77. Потрясаев С.А. Синтез технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб, 2020. 312 с.

78. 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.

79. 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.

80. Пиманов И.Ю. Программные инструментальные средства для комплексного моделирования при мониторинге и прогнозировании развития чрезвычайных ситуаций с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 11. С. 988-996.

81. 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. Т. 12. № 7-8. С. 54-60.

82. Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю. Управление информационными процессами в системах моделирования природных объектов // Информатизация и связь. 2020. №5. С.182-187. <http://dx.doi.org/10.34219/2078-8320-2020-11-5-182-187>

83. Зеленцов В.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р., Потрясаев С.А., Семенов А.Е. Информационные технологии и система для выполнения междисциплинарных проектов и создания тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли //

Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева (Санкт-Петербург, 20-21 октября 2020 г.): сборник статей. СПб: 2020. С. 25-31.

84. Hohpe G., Woolf B., Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions. Addison-Wesley, 2004.

85. Potriasaev S., Zelentsov V., Pimanov I. Computational Processes Management Methods and Models in Industrial Internet of Things // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol.1047. P. 266-276. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-31362-3\\_26](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-31362-3_26)

86. Open Geospatial Consortium: [сайт]. URL: <https://www.ogc.org/> (дата обращения: 10.04.2022).

87. Зеленцов В.А., Кожанов А.Н., Пиманов И.Ю., Потрясаев С.А. Архитектура и программный прототип мобильной информационно-аналитической системы мониторинга и управления территориями и предприятиями АПК // Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве» (Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2015 г.): материалы конференции. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. С. 142-145.

88. MapServer and GeoServer (and tilecache) comparison serving Ordnance Survey raster maps [Электронный ресурс] // Exegesis: [сайт]. URL: <http://www.esdm.co.uk/mapserver-and-geoserver-and-tilecache-comparison-serving-ordnance-survey-raster-maps> (дата обращения: 10.04.2022).

89. Пиманов И.Ю. Выбор и программная реализация алгоритма представления данных дистанционного зондирования Земли при разработке мобильных веб-сервисов // Научная сессия ГУАП: сборник докладов, в 3 частях. Под общей редакцией Ю. А. Антохиной. 2015. С. 272-275.

90. Пиманов И.Ю. Методика размещения данных дистанционного зондирования Земли на картографическом веб-сервере // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Географы в годы войны и мира» в рамках XI Большого географического

фестиваля, посвященная 70-летию победы в Великой отечественной войне 1941-1945 гг. и 170-летию Русского географического общества: материалы конференции. СПб, 2015. С. 469-470.

91. Georgia Garani, George K. Adam, Dimitrios Ventzas. Temporal data warehouse logical modelling // International Journal of Data Mining, Modelling and Management (IJDMMM). 2016. Vol. 8. No. 2.

92. Когаловский М.Р. Методы интеграции данных в информационных системах. М., 2010.

93. Интеграция данных и Хранилища. [Электронный ресурс] // CitCity: [сайт]. URL: <http://citcity.ru/12101/> (дата обращения: 10.04.2022).

94. Тютякин А.А., Попов Ф.А. Методы построения интегрированной системы управления вузом // Информация и образование: границы коммуникаций. 2010. № 2 (10). С. 127-128.

95. Когаловский М.Р. Интеграция данных в информационных системах // Третья Всероссийская конференция «Стандарты в проектах современных информационных систем» (Москва, 23-24 апреля 2003 г.): материалы конференции. М., 2003.

96. Open Archives Initiative: [сайт]. URL: <http://www.openarchives.org/> (дата обращения: 10.04.2022).

97. Черняк Л. Интеграция данных: синтаксис и семантика // Открытые системы, 2009. №10.

98. Черний А.В., Тузовский А.Ф. Развитие информационной системы организации с использованием семантических технологий // Всероссийская конференция с международным участием «Знания–Онтологии–Теория» (Новосибирск, 20–22 октября 2009 г.): материалы конференции. Новосибирск: ЗАО «РИЦ Прайс-Курьер», 2009. Т. 2. С. 52–59.

99. Алабян А.М. и др. Оперативное прогнозирование наводнений на основе комплексного упреждающего моделирования и интеграции разнородных данных // Труды СПИИРАН. 2015. № 4(41). С. 5-33.

100. GraphQL: [сайт]. URL: <https://graphql.org/> (дата обращения: 10.04.2022).
101. Плотников А.М., Рыжиков Ю.И., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Анализ современного состояния и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации (по материалам конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД)) // Труды СПИИРАН. 2013. № 25 (2). С. 42-112.
102. Троцкий Д.В., Городецкий В.И. Сценарная модель знаний и язык описания процессов для оценки и прогнозирования ситуаций // Труды СПИИРАН. 2009. Вып. 8. С. 94-127.
103. Мельников Г. П. Системология и языковые аспекты кибернетики, М.: Советское радио, 1978. 368 с.
104. IDEF: [сайт]. URL: <https://www.idef.com/> (дата обращения: 10.04.2022).
105. UML: [сайт]. URL: <https://www.uml.org/> (дата обращения: 10.04.2022).
106. BPMN: [сайт]. URL: <https://www.bpmn.org/> (дата обращения: 10.04.2022).
107. Vasiliev, Y. SOA and WS-BPEL: Composing Service-Oriented Solution with PHP and ActiveBPEL. Packt Publishing, 2007.
108. Юдицкий С.А. Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем. М.: СИНТЕГ, 2001. 112 с.
109. Павлов А.Н., Соколов Б.В. Осипенко С.А., Алешин Е.Н., Зиновьев С.В., Копкин Е.В. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения. Учебник / под редакцией Павлова А.Н. СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. 357 с.
110. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Pavlov A.A., Slin'ko A.A. The Technique of Multi-Criteria Decision-Making in the Study of Semi-Structured Problems // 6<sup>th</sup> Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017): proceedings. Springer International Publishing Switzerland, 2017. Vol 2: Cybernetics and Mathematics

Applications in Intelligent Systems. P.131-140. DOI: 10.1007/978-3-319-57264-2\_13

111. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 286 с.

112. Refice A., D'Addabbo A., Capolongo D. Methods, Techniques and Sensors for Precision Flood Monitoring Through Remote Sensing // Flood Monitoring through Remote Sensing / Refice A., D'Addabbo A., Capolongo D. (eds.). Springer Remote Sensing/Photogrammetry, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-63959-8\_1.

113. SciPy: [сайт]. URL: <https://scipy.org/> (дата обращения: 10.04.2022).

114. CivicStructure: [сайт]. URL: <https://schema.org/CivicStructure> (дата обращения: 10.04.2022).

115. Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Выделение контуров затопленных территорий по материалам радарной съёмки для верификации результатов краткосрочного прогнозирования паводковых наводнений // II международная научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения» (Санкт-Петербург, 08-10 ноября 2017 г.): материалы конференции. СПб: Политехника, 2017. С. 52-57.

116. Матьяш В.А., Пономаренко М.Р., Пиманов И.Ю. Разработка методов выделения зон затоплений по материалам радарной съёмки для верификации результатов моделирования наводнений // Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД 2017)» (Санкт-Петербург, 18-20 октября 2017 г.): сборник трудов. СПб, 2017. С. 461-463.

117. Mason D.C., Giustarinib L., Garcia-Pintadoa J., Clokec H.L.. Detection of flooded urban areas in high resolution Synthetic Aperture Radar images using double scattering // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014. Vol. 28. P. 150–159.



118. Chini M., Hostache R., Giustarini L., Matgen P. A Hierarchical Split-Based Approach for Parametric Thresholding of SAR Images: Flood Inundation as a Test Case // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017. Vol. 55. No. 12. Pp. 6975–6988.

119. Martinis S., Kersten J., Twele A. A fully automated TerraSAR-X based flood service // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015. Vol. 104. P. 203–212.

120. 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.

121. Родионова Н.В. Анализ изображений Sentinel 1 для весеннего паводка в Алтайском крае в апреле 2015 года и Рязанской области в апреле 2016 года // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2017. Т. 14. № 1. С. 136–146. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-136-146.

122. Bolanos S., Stiff D., Brisco B., Pietroniro A. Operational Surface Water Detection and Monitoring Using Radarsat 2 // *Remote Sensing*, 2016. 8. 285. DOI: /10.3390/rs8040285.

123. Ponomarenko M.R., Pimanov I.Yu. Processing of SAR amplitude images with posting the results on web server // *Journal Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2016. Vol. 9. No. 7. P. 994–1000. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-994-1000.

124. Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Использование геоинформационных технологий и данных радиолокационной съемки для мониторинга объектов горного производства // 9-я конференция «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016)» (Санкт-Петербург,

04-06 октября 2016 г.): материалы. СПб, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С.435-439.

125. Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Использование данных космического радиолокационного зондирования для верификации результатов краткосрочного прогнозирования паводковых наводнений // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «География в современном мире: вековой прогресс и новые приоритеты» в рамках XI Большого географического фестиваля, посвященная 100-летию создания первого в России специального географического высшего учебного заведения - Географического института (Санкт-Петербург, 06-08 апреля 2018 г.): материалы конференции. Санкт-Петербург, 2018. С. 636-639.

126. Refice A., Capolongo D., Pasquariello G., D'Addabbo A., Bovenga F., Nutricato R., Lovergine F., Pietranera L. SAR and InSAR for flood monitoring: examples with COSMO-SkyMed data // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014. Vol. 7. No. 7. Pp. 2711–2722. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2305165.

127. Martinis S., Rieke C. Backscatter Analysis Using Multi-Temporal and Multi-Frequency SAR Data in the Context of Flood Mapping at River Saale // Germany Remote Sensing, 2015. Vol. 7. P. 7732–7752.

128. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Опыт разработки и тестирования информационных технологий автоматизации комплексного моделирования речных наводнений // Всероссийская научная конференция «Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения» (Нижний Новгород, 8-14 сентября 2019 г.): сборник научных трудов. Москва. 2019. С. 140-144.

129. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Система мониторинга и прогнозирования гидрологической обстановки на реке Северная Двина на базе интегрированного использования комплекса моделей и наземно-космических данных // Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого

развития Российской Федерации» (Санкт-Петербург, 14–15 марта 2019 г.): сборник тезисов. 2019. С. 459-461.

130. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Алгоритмические основы построения компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров // Вестник ПГУ. Серия С: Фундаментальные науки. 2011. № 12. С. 51–56.

131. Барышников Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел. СПб: Изд-во РГГМУ, 2003.

132. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю. Программно-аппаратный комплекс и интеллектуальные технологии оперативного прогнозирования речных наводнений // V межрегиональная научно-практическая конференция «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий» (Севастополь, 24-28 сентября 2019 г.): материалы конференции. Севастополь, 2019. С. 381-382.

133. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013610703. ЕСОМАГ / Мотовилов Ю. Г.; правообладатель ФГБУН Институт водных проблем РАН. Заявка № 2012660119; дата поступления 22.11.2012, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.01.2013.

134. Чурюлин Е.В., Крыленко И.Н., Фролова Н.Л., Беляев Б.М., Розинкина И.А. Расчет половодий на р. Сухоне на основе совместного использования моделей ЕСОМАГ и COSMO-Ru // Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России). 2019. № 1 (371). С. 6-24.

135. Беликов В.В., Милитеев А.Н. Двуслойная математическая модель катастрофических паводков // Вычислительные технологии. 1992. № 3. С. 167–172.

136. MIKE: [сайт]. URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/> (дата обращения: 10.04.2022).

137. Delft3D: [сайт]. URL: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d> (дата обращения: 10.04.2022).

138. HEC-RAS river analysis system: [сайт]. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (дата обращения: 10.04.2022).
139. FLO-2D: [сайт]. URL: <https://flo-2d.com/> (дата обращения: 10.04.2022).
140. TELEMAC: [сайт]. URL: <http://www.opentelemac.org/> (дата обращения: 10.04.2022).
141. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612181. Программный комплекс STREAM\_2D для расчёта течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках / Беликов. В.В., Кочетков В.В. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.02.2014.
142. Van der Knijff J.M., Younis J., De Roo A.P.J. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation // International Journal of Geographical Information Science. 2010. V. 24. P. 189-212.
143. Проект INFROM «Integrated Intelligent Platform for Monitoring the Cross-Border Natural-Technological Systems»: [сайт]. URL: <http://infrom.eu/> (дата обращения: 10.04.2022).
144. Зеленцов В.А. Петухова Ю.Ю., Потрясаев С.А., Рогачёв С.А. Технология оперативного автоматизированного прогнозирования разлива реки в период весенних паводков // Тематический выпуск журнала «Труды СПИИРАН», Технологии и примеры решения задач автоматизации и интеллектуализации процессов наземно-аэрокосмического мониторинга. 2013. Вып. 6 (29). С. 40–57.
145. Шержуков Е.Л. Региональные системы мониторинга опасных природных и техногенных явлений на примере Краснодарского края // Всероссийская научная конференция «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз» (Краснодар, 07-12 октября 2013 г.): материалы конференции. Новочеркасск: Изд-во ЛИК, 2013. С. 261–265.

146. Romanovs A., Sokolov B.V., Lektuers A. et al. Crowdsourcing interactive technology for natural-technical objects integrated monitoring // Speech and Computer. Lecture Notes in Computer Science. 2014. V. 8773. P. 176–183.

147. WSO2 Enterprise Integrator: [сайт]. URL: <https://wso2.com/integration/> (дата обращения: 10.04.2022).

148. Krylenko I., Alabyan A., Aleksyuk A., Belikov V., Sazonov A., Zavyalova E., Pimanov I., Potryasaev S., Zelentsov V. Modeling Ice-Jam Floods in the Frameworks of an Intelligent System for River Monitoring // Water Resources. 2020. 47. P. 387-398. DOI: 10.1134/s0097807820030069.

149. Copernicus Open Access Hub: [сайт]. URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (дата обращения: 10.04.2022).

150. EarthExplorer: [сайт]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 10.04.2022).

151. Геопортал Роскосмоса: [сайт]. URL: <https://gptl.ru/about> (дата обращения: 10.04.2022).

152. Алексеевский Н.И., Крыленко И.Н., Беликов В.В. и др. Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6–7 июля 2012 г. // Гидротехническое строительство. 2013. № 3. С. 29–35.

153. Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Фёдорова Т.А. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // Геориск. 2015. № 1. С. 18–25

154. Калугин А.С., Крыленко И.Н. Математическое моделирование движения паводочной волны при использовании исходной информации различной детальности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 3. С. 38–57.

155. Merkuryev Y., Okhtilev M., Sokolov B. et al. Intelligent Technology for Space and Ground based Monitoring of Natural Objects in Cross-Border EU-Russia Territory // International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012) (Munich, July 22-27, 2012): proceedings. 2012. P. 2759–2762.

156. Sokolov B.V., Okhtilev M.Yu., Zelentsov V.A., Maslova M.A. The Intelligent Monitoring Technology Based on Integrated Ground and Aerospace Data // Int. Conf. on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S (Vienna, September, 19-21, 2012): proceedings. 2012. P. 112–117.

157. Зеленцов В.А., Ковалёв А.П., Охтилев М.Ю. и др. Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов // Тематический выпуск журнала «Труды СПИИРАН». Методологические и методические основы решения проблем наземно-космического мониторинга. 2013. Вып. 5(28). С. 7–81.

158. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2004. № 6. С. 5–16.

159. ГОСТ Р 22.8.09-2014 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Требования к расчету уровня безопасности, риска и ущерба от подтопления градопромышленных территорий: утв. и введ. в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 октября 2014 г. N 1363-ст, дата введения 2015-06-01. М.: Стандартинформ, 2015.

160. Зеленцов В.А., Пиманов И.Ю., Потрясаев С.А., Семенов А.Е., Алабян А.М., Крыленко И.Н. Опыт создания и тестирования региональной системы мониторинга и анализа гидрологической обстановки на примере участка реки Северная Двина // Четырнадцатая Общероссийская научно-практическая конференция и выставка изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 11–14 декабря 2018 г.): материалы докладов. М., 2018. С. 207-214.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**ПОЛНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ**  
**ИССЛЕДОВАНИЯ**

**В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

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. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Пономаренко М.Р. Автоматизация мониторинга и комплексного моделирования гидрологической обстановки в бассейнах рек // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 55. 2019. Стр. 74-85. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-55-74-85

8. **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

9. 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, DOI: 10.25296/1997-8650-2018-12-7-8-54-60.

10. 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.

11. 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.

12. 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.



13. 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. Krylenko I., Alabyan A., Alekseyuk A., Belikov V., Sazonov A., Zavyalova E., **Pimanov I.**, Potryasaev S., Zelentsov V. Modeling Ice-Jam Floods in the Frameworks of an Intelligent System for River Monitoring // Water Resources. 47. 2020. P. 387-398. DOI: 10.1134/S0097807820030069.

3. 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.

4. Zelentsov V., Brovkina O., **Pimanov I.**, Potryasaev S. Automatization of forest ecosystems sustainability estimation based on complex modelling and Earth observation data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 507. 2020. 012034. DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012034.

5. 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.

6. Potriasaev 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

7. Zelentsov, V., Potryasaev, S., **Pimanov I.**, Mochalov V. Software suite for creating downstream applications and thematic services on the base of remote sensing data processing and integrated modelling // International Geoscience and Remote Sensing Systems Symposium (IGARSS 2018) (Valencia, July 22-27, 2018): proceedings. P. 3477-3480 (2018). DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519066.
8. Sokolov B.V., Alferov V.V., Salukhov V.V., **Pimanov I.Yu.** Fundamentals of Complex Objects Structural Dynamics Proactive Management Theory and its Application // International Scientific Conference Mathematical methods in engineering and technology (MMET NW 2018) (St. Petersburg, September 10-14, 2018): proceedings. St. Petersburg, 2018. P.79–81.
9. Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Kulakov A.Yu., **Pimanov I.Yu.** Models and Methods of Reconfiguration of Complex Technical Objects under Different Situation Conditions // International Scientific Conference «Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMET NW 2018)» (St. Petersburg, September 10-14, 2018): proceedings. P.361–363.
10. 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.
11. Sokolov B., Micony S., Ziuban A., Burakov V., **Pimanov I.**, Ivanov D. Theory and practice of information fusion models' quality estimation and models' quality control // 29th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS 2017), Held at the International Multidisciplinary Modeling and Simulation Multiconference (I3M 2017) (Barcelona, September 18-20, 2017): proceedings. P. 194-203.
12. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., **Pimanov I.J.**, Nemykin S.A. Creation of intelligent information flood forecasting systems based on service-oriented architecture // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. Vol.

466. Springer International Publishing Switzerland. P. 371-381. DOI: 10.1007/978-3-319-33389-2\_35.

13. Mochalov V.F., Markov A.V., Grigorieva O.V., Zhukov D.V., Brovkina O.V., **Pimanov I.Y.** Remote Sensing for Environmental Monitoring. Complex Modeling // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016. Springer International Publishing Switzerland. P. 497-506. DOI: 10.1007/978-3-319-33389-2\_47

### **В изданиях РИНЦ:**

1. Соколов Б.В., Зеленцов В.А., **Пиманов И.Ю.**, Юсупов Р.М. Комплексное моделирование и проактивное управление сложными объектами в условиях чрезвычайных ситуаций // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021) (Санкт-Петербург, 20-22 октября 2021): труды конференции. Санкт-Петербург, 2021. С. 65-76.

2. Зеленцов В.А., **Пиманов И.Ю.**, Пономаренко М.Р., Потрясаев С.А., Семенов А.Е. Информационные технологии и система для выполнения междисциплинарных проектов и создания тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева (Санкт-Петербург, 20-21 октября 2020 г.): сборник статей. СПб: 2020. С. 25-31.

3. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Семенов А.Е. Принципы построения и примеры реализации информационной системы принятия управленческих решений обеспечения экологической безопасности сельскохозяйственного производства // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. № 1(98). 2019. С. 6-17. DOI: 10.24411/0131-5226-2019-10117.

4. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Пономаренко М.Р. Опыт разработки и тестирования информационных технологий автоматизации комплексного моделирования речных наводнений // Всероссийская научная конференция «Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения» (Нижний Новгород, 8-14 сентября 2019 г.): сборник научных трудов. Москва. 2019. С. 140-144.

5. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.** Программно-аппаратный комплекс и интеллектуальные технологии оперативного прогнозирования речных наводнений // V межрегиональная научно-практическая конференция «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий» (Севастополь, 24-28 сентября 2019 г.): материалы конференции. Севастополь, 2019. С. 381-382.

6. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Пономаренко М.Р. Система мониторинга и прогнозирования гидрологической обстановки на реке Северная Двина на базе интегрированного использования комплекса моделей и наземно-космических данных // Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации» (Санкт-Петербург, 14–15 марта 2019 г.): сборник тезисов. 2019. С. 459-461.

7. Зеленцов В.А., **Пиманов И.Ю.**, Семенов А.Е., Соколов Б.В. Интеллектуальные технологии и система оперативного прогнозирования речных наводнений // XII мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2019) (Геленджик, 23-28 сентября 2019 г.): труды конференции. Том 1. Материалы докладов локальной научно-технической конференции «Модели, методы и технологии интеллектуального управления» (ИУ-2019). Таганрог: Изд-во Южного федерального университета. 2019. С. 71-73.

8. Зеленцов В.А., **Пиманов И.Ю.**, Потрясаев С.А., Семенов А.Е., Алабян А.М., Крыленко И.Н. Опыт создания и тестирования региональной системы мониторинга и анализа гидрологической обстановки на примере участка реки Северная Двина // Четырнадцатая Общероссийская научно-

практическая конференция и выставка изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 11–14 декабря 2018 г.): материалы докладов. М., 2018. С. 207-214.

9. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., **Пиманов И.Ю.**, Потрясаев С.А., Семенов А.Е. Информационная платформа для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Седьмой белорусский космический конгресс (Минск, 24-26 октября 2017 г.): материалы. Т.2. С.242-245.

10. Матьяш В.А., Пономаренко М.Р., **Пиманов И.Ю.** Разработка методов выделения зон затоплений по материалам радарной съёмки для верификации результатов моделирования наводнений // Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД 2017)» (Санкт-Петербург, 18-20 октября 2017 г.): сборник трудов. СПб, 2017. С. 461-463.

11. **Пиманов И.Ю.**, Пономаренко М.Р. Выделение контуров затопленных территорий по материалам радарной съёмки для верификации результатов краткосрочного прогнозирования паводковых наводнений // II международная научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения» (Санкт-Петербург, 08-10 ноября 2017 г.): материалы конференции. СПб: Политехника, 2017. С. 52-57.

12. **Пиманов И.Ю.** Представление результатов прогнозирования наводнений средствами информационно-аналитической системы с сервис-ориентированной архитектурой // 9-я конференция «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016)» (Санкт-Петербург, 04-06 октября 2016 г.): материалы конференции. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С.431-434.

13. **Пиманов И.Ю.**, Пономаренко М.Р. Использование геоинформационных технологий и данных радиолокационной съемки для

мониторинга объектов горного производства // 9-я конференция «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016)» (Санкт-Петербург, 04-06 октября 2016 г.): материалы. СПб, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С.435-439.

14. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Кожанов А.Н., **Пиманов И.Ю.**, Потрясаев С.А. Информационно-аналитическая система управления развитием территорий на базе использования данных дистанционного зондирования земли и мобильных геоинформационных технологий // Экология. Экономика. Информатика. Сборник статей, в 3 т. Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 2015. Т.3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. С. 48-59.

15. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Кожанов А.Н., **Пиманов И.Ю.**, Потрясаев С.А., Скобцов В.Ю. Интеграция подсистем и сервисов доступа к результатам космического мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций // XIV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2014)» (Санкт-Петербург, 29-31 октября 2014 г.): материалы конференции. СПОИСУ. СПб, 2015. С.39-43.

16. Зеленцов В.А., Кожанов А.Н., **Пиманов И.Ю.**, Потрясаев С.А. Реализация междисциплинарных проектов на базе открытой ГИС-платформы // Международная научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения» (Санкт-Петербург, 11-13 ноября 2015 г.): сборник материалов конференции. Санкт-Петербург: Изд. «Политехника». С. 162-166.

### **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. et al. River Flood Forecasting System: An Interdisciplinary Approach // Flood Monitoring through Remote Sensing / Refice

A., D'Addabbo A., Capolongo D. (eds). Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, Cham, 2018.

**В прочих изданиях:**

1. **Пиманов И.Ю.**, Пономаренко М.Р. Использование данных космического радиолокационного зондирования для верификации результатов краткосрочного прогнозирования паводковых наводнений // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «География в современном мире: вековой прогресс и новые приоритеты» в рамках XI Большого географического фестиваля, посвященная 100-летию создания первого в России специального географического высшего учебного заведения - Географического института (Санкт-Петербург, 06-08 апреля 2018 г.): материалы конференции. Санкт-Петербург, 2018. С. 636-639.

2. Zelentsov V., Potryasaev S., **Pimanov I.**, Mochalov V. Intellectual information platform for thematic services creation with integrated use of ERS and in-situ data // International conference «Quo vaditis agriculture, forestry and society under global change?» (Velké Karlovice, October 02-04, 2017): proceedings. P.81-85.

3. **Пиманов И.Ю.** Методика размещения данных дистанционного зондирования Земли на картографическом веб-сервере // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Географы в годы войны и мира» в рамках XI Большого географического фестиваля, посвященная 70-летию победы в Великой отечественной войне 1941-1945 гг. и 170-летию Русского географического общества: материалы конференции. СПб, 2015. С. 469-470.

4. Зеленцов В.А., Кожанов А.Н., **Пиманов И.Ю.**, Потрясаев С.А. Архитектура и программный прототип мобильной информационно-аналитической системы мониторинга и управления территориями и предприятиями АПК // Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Применение средств дистанционного

зондирования Земли в сельском хозяйстве» (Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2015 г.): материалы конференции. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. С. 142-145.

### **Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:**

1. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Семенов А.Е. Веб-приложение для мониторинга осадков на карте «Дождевик». Свидетельство №2020613966. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 25.03.2020.

2. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Семенов А.Е. Веб-приложение фиксации пространственного положения адресных объектов «Адрес Про». Свидетельство № 2019664431. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06.11.2019. 2019.

3. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Семенов А.Е. Веб-приложение для информационного сопровождения управления работами на территории «КартоМетка». Свидетельство №2019664291. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 05.11.2019. 2019.

4. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Семенов А.Е. Веб-приложение для построения пешеходных маршрутов «Тихоход». Свидетельство № 2019664457. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 07.11.2019. 2019.

5. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**, Семенов А.Е. Веб-приложение для просмотра разновременных пространственных данных «Кварц Про». Свидетельство № 2019664458. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 07.11.2019. 2019.

6. 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

7. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., **Пиманов И.Ю.**: Система для автоматизации выявления изменений на территориях по данным



дистанционного зондирования Земли. Свидетельство №2018612655.  
Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.03.2018

8. 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

9. 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

10. 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

11. 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.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



**МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА  
(МГУ)  
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ**

Ленинские горы, Москва,  
ГСП-2, 119992  
Тел.: 939-10-00, 203-65-65  
Факс: 939-01-26

24.09.2021 № 108-9-33/198.

На № \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ:  
Декан географического факультета МГУ  
имени М.В.Ломоносова,  
член-корреспондент РАН



С.А.Добролюбов

## АКТ

о внедрении результатов диссертации, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук **Пиманова Ильи Юрьевича**

Результаты диссертации И.Ю.Пиманова, посвященной разработке метода и программных средств автоматизации функционирования распределенных систем комплексного моделирования речных наводнений, а именно:

- методики и алгоритмы для организации взаимодействия аппаратно-программных средств сбора и обработки исходных наземно-космических данных, выбора и настройки моделей, интерпретации и визуализации результатов моделирования речных наводнений;

- программный комплекс для автоматизации функционирования распределенной системы комплексного моделирования речных наводнений на реке Северная Двина;

используются в лекционных и практических занятиях по курсу «Моделирование гидрологических процессов» по направлению подготовки 05.04.04 «Гидрометеорология» профиль «Гидрология» уровня высшего образования магистратура.

Зам. декана по учебной работе  
Географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,  
к.г.н., доцент

А.И.Прасолова

Зав. Кафедрой гидрологии суши  
Географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,  
Д.г.н., профессор

Н.Л.Фролова

УТВЕРЖДАЮ

Начальник

ФГБУ «Северное УГМС»

Р.В. Еринов

«06» Октября 2021 г.



### АКТ РЕАЛИЗАЦИИ

результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени кандидата технических наук Пиманова Ильи Юрьевича

Комиссия в составе: председатель – начальник отдела речных и морских гидрологических прогнозов Белихина Наталья Валентиновна, члены комиссии: ведущий гидролог отдела речных и морских гидрологических прогнозов Соломатова Наталья Васильевна, гидролог 2 категории отдела речных и морских гидрологических прогнозов Одоев Леонид Сергеевич составила настоящий акт о том, что разработанный в диссертации Пиманова И.Ю. программный комплекс для автоматизации функционирования распределенной системы комплексного моделирования речных наводнений прошел апробацию и использован как дополнительное средство наблюдений при мониторинге наводнений на участке реки Северной Двины от г. Великий Устюг до г. Котлас. С помощью программного комплекса обеспечивалась автоматизация получения и обработки данных об уровне и расходе воды, предоставляемых Северным УГМС, загрузка данных в расчетные модели, загрузка спутниковых данных, интерпретация и визуализация результатов оперативного прогнозирования наводнений в виде динамической цифровой карты зон и глубин затоплений.

Положительный эффект от использования разработанного программного комплекса заключается в повышении оперативности и наглядности фактической обстановки для оценки складывающейся обстановки.

Председатель комиссии:

Белихина Н.В. *Белихина*

Члены комиссии:

Соломатова Н.В. *Соломатова*

Одоев Л.С. *Одоев*

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки

Институт водных проблем  
Российской академии наук  
(ИВП РАН)

119333 г. Москва, ул. Губкина, 3

тел.: 8-499-135-54-56

факс: 8-499-135-54-15

E-mail: [iwapr@iwp.ru](mailto:iwapr@iwp.ru)

<http://www.iwp.ru>

ОКПО 02698884, ОГРН 1027739512305

ИНН/КПП 7701003690/773601001

29.09.2021 № 13202-6224/322  
на \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

О внедрении результатов диссертации  
Пиманова И.Ю.

Председателю  
Диссертационного  
совета Д.002.199.01,  
ФГБУН «Санкт-Петербургский  
Федеральный исследовательский  
центр Российской академии наук».

Р.М. Юсупову

СПб ФИЦ РАН
Вх.№ 60-01-02-680
«01» 10 2021 г.

Уважаемый Рафаэль Мидхатович!

Настоящим подтверждаю, что материалы и результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Пиманова Ильи Юрьевича по созданию методического и программного обеспечения автоматизации функционирования распределенных систем комплексного моделирования речных наводнений, в том числе:

- методическое и алгоритмическое обеспечение для организации совместного функционирования аппаратно-программных средств сбора наземно-космических данных, гидрологических и гидродинамических моделей;
- комплекс программных средств для автоматизации функционирования распределенных систем комплексного моделирования речных наводнений и визуализации результатов моделирования,

использованы специалистами Института (д.т.н. В.В. Беликов, к.г.н. И.Н. Крыленко, к.г.н. А.М. Алабян) для апробации системы автоматизированного прогнозирования речных наводнений на базе моделей ECOMAG и STREAM-2D (в рамках проекта «Методология и сервис-ориентированная технология создания и использования системы комплексного автоматизированного моделирования природных и природно-технологических объектов и ее реализация для оперативного прогнозирования речных наводнений») и показали возможность повышения оперативности и наглядности предоставления результатов прогнозирования конечным пользователям.

Директор Института,  
чл-корр. РАН



А.Н. Гельфан