

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ

На правах рукописи

МАТЕРУХИН АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**Теоретические основы и методология обработки потоков
пространственно-временных данных**

Специальность 25.00.35 – Геоинформатика

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
А.А. Майоров

Москва - 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
1.1 Возникновение новой научной парадигмы «Больших данных» и ее влияние на геоинформатику	16
1.2 Обработка данных в ГИС.....	22
1.3 Потоки пространственно-временных данных и проблемы, связанные с их обработкой.....	26
1.4 Краткие выводы по Главе 1.....	44
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ ПОТОКОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ	47
2.1 Представление данных измерений и наблюдений в современных системах сбора пространственно-временных данных.....	49
2.2 Математическая модель процессов непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе	58
2.2.1 <i>Определение целей моделирования.....</i>	<i>58</i>
2.2.2 <i>Анализ применимости существующих моделей обработки данных в ГИС</i>	<i>60</i>
2.2.3 <i>Ввод и формализация необходимых для построения модели понятий, построение базовой модели</i>	<i>62</i>
2.3 СИСТЕМА ТИПОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ.....	77
2.4 Краткие выводы по Главе 2.....	96

ГЛАВА 3 МЕТОДОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ПОТОКОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ	98
3.1 ПРОЦЕССЫ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ ПРОЦЕССУ ОБРАБОТКИ ПОТОКОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ В ГИС.....	102
3.2 ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОТОКОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ	105
3.2.1 <i>Контроль неопределенности данных в подсистеме автоматической валидации входных данных.....</i>	<i>107</i>
3.2.2 <i>Процессы в Подсистеме получения результатов</i>	<i>109</i>
3.3 КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	126
ГЛАВА 4 ВОПРОСЫ ПРИМЕНИМОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	127
4.1 ПРОГРАММНАЯ СРЕДА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОТОКОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ	128
4.2 СВЕДЕНИЯ О ПРАКТИЧЕСКОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	141
4.3 КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	150
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	153
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА	171
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	173

Введение

Актуальность темы исследования. С 90-х годов прошлого века большинство разработчиков программного обеспечения для геоинформационных систем (ГИС) начали использовать системы управления реляционными базами данных. Для работы с пространственными данными в таких системах были разработаны специальные пространственные индексы (R, R+, R* - деревья, BSP-деревья, k-мерные деревья, квадродеревья и октодеревья и многие другие). До сравнительно недавнего времени этих технологий было достаточно, чтобы удовлетворять требования к обработке пространственных и пространственно-временных данных со стороны наук о Земле и смежных с ними социально-экономических наук, а также использовать эти данные для принятия управленческих решений. Однако прогресс в разработке малоразмерных сенсорных устройств, датчиков определения местоположения, недорогих и небольших по размеру вычислительных платформ, а также распространение повсеместного беспроводного доступа привели к тому, что исследователи в области наук о Земле получили возможность получать данные с невозможной ранее пространственно-временной детализацией, а технический прогресс в этой области существенно удешевил использование этих технологий. Это увеличение пространственно-временной детализации собираемых данных привело к росту интенсивности потоков данных (под которой в настоящей работе понимается количество элементов потока данных, поступающих в систему обработки за единицу времени), обрабатываемых в ГИС. Однако такое увеличение интенсивности потоков пространственно-временных данных ведет, в свою очередь, на определенном уровне интенсивности этих потоков к невозможности

непрерывной обработки данных, поступающих в геоинформационную систему, использующую систему управления реляционной базой данных. Эта невозможность вызвана двумя причинами: с одной стороны - это несоответствие объекта обработки (потоков пространственно-временных данных) реляционной модели, а с другой стороны – это несоответствие модели «обработка после сохранения» требованию к непрерывности обработки. Более подробно эти причины разбираются в Главе 1 настоящей работы. Таким образом, актуальность темы исследования определяется тем, что современные требования к непрерывной обработке пространственно-временных данных в ГИС с возможностью выполнения пространственных запросов к этим данным в режиме реального времени уже не могут быть удовлетворены в рамках традиционного подхода с использованием реляционных баз данных.

Степень разработанности темы исследования. Постоянное развитие теории, методологии и технологий создания геоинформационных систем (ГИС), функциональность которых соответствовала бы текущим потребностям практики, всегда было одной из основных задач геоинформатики. Большой вклад в решение этой задачи внесли такие российские специалисты в области геоинформатики как Гитис В.Г., Журкин И.Г., Карпик А.П., Кошкарёв А.В., Кулагин В.П., Майоров А.А., Пьянков С.В., Розенберг И.Н., Савиных В.П., Тикуннов В.С., Цветков В.Я. и другие, а также такие зарубежные ученые как Goodchild M.F., Hoel E., Knoblock C. A., Shekhar S., Worboys M.F. и другие.

Однако появление новых достижений в смежных областях науки и техники, общее изменение технологического ландшафта, появление в науках о Земле и смежных с ними социально-экономических науках новых потребностей в обеспечении информацией приводит к тому, что геоинформатика, получая новые инструменты и области исследования, сталкивается с новыми научными проблемами, требующими решения. Именно такую ситуацию вызвало появление и распространение новой технологии получения данных с помощью сетей геосенсоров о поведении природных и социально-экономических геосистем, их

взаимодействии и развитии. Под геосенсором в настоящей работе понимается устройство с возможностью определения своего местоположения и возможностями передачи данных в централизованную систему обработки, оборудованное датчиком (сенсором), которое предназначено для получения данных о событиях, для которых пространственный аспект собранных данных имеет существенное значение. Значимость пространственного аспекта собранных данных может проявляться по крайней мере на одном из следующих уровней:

- на уровне контента, то есть пространственный аспект может быть основным содержанием данных, собираемых датчиками (например, датчиками, регистрирующими движение или деформацию объектов);

- на уровне анализа, то есть сведения о местоположении датчиков могут обеспечить интегративный уровень для анализа собранных данных (например, для анализа пространственного распределения каких-либо параметров изучаемых геосистем).

Полезность использования такого инструмента увеличивается с увеличением количества используемых геосенсоров, поэтому имеет смысл говорить о технологиях сбора пространственно-временных данных не с помощью геосенсоров, а с помощью сетей геосенсоров. В научной литературе уже описано достаточно много примеров использования сбора данных с помощью сетей геосенсоров для изучения геосистем. Эффективность использования этих новых инструментов тем выше, чем выше скорость обработки этих получаемых данных. При увеличении объема и скорости поступления пространственно-временных данных возникает и приобретает все большее значение требование к непрерывности обработки этих данных, поскольку эти данные используются для мониторинга непрерывных явлений в режиме реального времени. Современные требования к непрерывности обработки пространственно-временных данных поступающих в ГИС от систем сбора данных предполагают, что непрерывные запросы на определение динамически меняющихся пространственных отношений между объектами наблюдения должны работать с потенциально неограниченными

потоками входящих потоков пространственно-временных данных и учитывать временной порядок в этих входящих данных. От ГИС требуется обеспечить низкую задержку обработки и стабильность этой задержки при возможных изменениях в интенсивности потоков поступающих данных. Эти современные требования к непрерывности обработки пространственно-временных данных в ГИС не могут быть удовлетворены в рамках традиционного подхода с использованием реляционных баз данных и модели «обработка после обязательного сохранения». Специфика потоков данных выводит их за пределы реляционной модели, а ограничителем скорости обработки в модели «обработка после обязательного сохранения» выступает такая характеристика дисковой памяти как время произвольного доступа. Применение твердотельных накопителей позволяет улучшить эту характеристику, но не изменить это ограничение существенным образом. Во многих предметных областях (например, в обработке потоков финансовых данных) уже произошел переход от систем управления базами данных (СУБД) к системам управления потоками данных (СУПД), в которых используется модель «обработка без обязательного сохранения». Однако в геоинформатике такого перехода не происходит, и этому есть причины. Проблема заключается в том, что используемые в настоящее время в ГИС модели пространственных и пространственно-временных данных, а также методология их обработки, разрабатывались для реляционных баз данных с построенными пространственными индексами, а для непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных необходимо разработать новые теоретические основы такой обработки и основанную на них методологию.

Таким образом, в настоящее время ситуация в геоинформатике характеризуется наличием объективного противоречия между новыми технологическими возможностями сбора пространственно-временных данных и отсутствием полноценных теоретических основ для обработки и анализа потоков пространственно-временных данных с возможностью выполнения

пространственных запросов к этим данным, используя которые можно было бы разработать методологию непрерывной обработки этих потоков данных в ГИС.

Целью исследования является разработка теоретических основ и методологии обработки потоков пространственно-временных данных, решающих проблему обеспечения непрерывности обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи исследования**:

1. Выполнить анализ проблемной ситуации, заключающейся в существовании объективного противоречия между новыми технологическими возможностями сбора пространственно-временных данных и отсутствием соответствующих технологических возможностей для непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных с возможностью выполнения пространственных запросов к этим данным в режиме реального времени.

2. Разработать необходимые теоретические основы непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС.

3. Разработать методологию непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах.

4. Выполнить анализ применимости разработанной методологии обработки потоков пространственно-временных данных.

В ходе исследования получены следующие **научные результаты**:

1. Введены новые понятия и термины геоинформатики, развивающие понятийный аппарат в области обработки пространственных и пространственно-временных данных.

2. Разработана математическая модель процессов непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС в режиме реального времени, повышающая эффективность компьютерного моделирования геосистем.

3. Разработана система типов пространственно-временных данных, расширяющая возможности построения запросов к потокам пространственно-

временных данных при обеспечении надежной верификации корректного поведения программного обеспечения ГИС.

4. Разработана методология обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС, обеспечивающая независимость времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков.

Научная новизна исследования и полученных научных результатов заключается в том, что:

1. Впервые предложено определение понятия «большие пространственные данные», соответствующее как современному понятийному аппарату в области больших данных, так и понятию «пространственные данные», используемому в современной геоинформатике. Формализован термин «поток пространственно-временных данных» и показано, что термин «поток пространственно-временных данных» позволяет на требуемом уровне абстракции сформулировать задачу реализации непрерывного выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных в ГИС в режиме реального времени.

2. Разработанная математическая модель процессов обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС в режиме реального времени в отличие от ранее предложенных моделей обработки данных в ГИС:

- учитывает специфику потоков пространственно-временных данных;
- позволяет реализовать непрерывную обработку потоков пространственно-временных данных, тем самым обеспечивая расширяемость и масштабируемость процессов обработки.

3. Разработанная система типов пространственно-временных данных в виде расширенной сигнатуры многосортной алгебраической системы в отличие от других:

- учитывает специфику потоков пространственно-временных данных;
- обеспечивает надежную верификацию корректного поведения программного обеспечения ГИС в среде распределенных вычислений;

- обеспечивает гибкость представления пространственно-временных данных в ГИС и дополнительные возможности построения запросов к этим данным.

4. Разработанная методология обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС в отличие от применяемых:

- учитывает специфику потоков пространственно-временных данных;
- обеспечивает масштабирование обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС в зависимости от интенсивности этих потоков;
- обеспечивает производительность обработки, при которой задержка выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных не превышает некоторой величины, задаваемой предметной областью использования ГИС.

Практическая значимость работы:

1. Разработанный понятийный аппарат в области обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе может быть использован:

- исследователями как в области геоинформатики, так смежных областей исследований;
- законодателями (регламентация оборота больших пространственных данных);
- разработчиками программного обеспечения для обработки и анализа больших пространственных данных.

Разработанная система понятий позволяет не только на корректном уровне абстракции формулировать возникающие задачи обработки и анализа больших пространственных и пространственно-временных данных, но и предоставляет необходимые для решения этих задач методологические инструменты.

2. Практическая значимость разработанной системы типов для потоков пространственно-временных данных в виде расширенной сигнатуры многосортной

алгебраической системы состоит не только в выразительности и гибкости предлагаемой системы типов, которая существенно снижает сложность и трудоемкость реализации различных запросов пространственной аналитики к потокам пространственно-временных данных, но и в обеспечении безопасности типизации разрабатываемых программных решений. Поскольку использование алгебраического подхода к разработке математически строгой и непротиворечивой системы типов пространственно-временных данных дает возможность автоматизировать проверку соответствия типов в программе, то применение этой разработанной системы типов снижает комбинаторную сложность тестирования программных комплексов, состоящих из различных уже отлаженных компонент. Упрощение разработки приложений для тестирования и верификации программного кода приводит к росту надежности разработанного программного решения.

3. Представлен анализ возможных областей применения разработанной методологии обработки потоков пространственно-временных данных на практике.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что идеи, положения и доказательства, которые образуют теоретические основы обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах и обосновывают разработанную автором диссертационной работы методологию, развивают теорию геоинформатики, используя новую общенаучную парадигму «больших данных». Это увеличивает возможности исследователей в проведении системного анализа многоуровневой и разнородной геоинформации, а также включает в научный оборот геоинформатики новейшие результаты исследований в смежных областях наук, примыкающих к области настоящего исследования.

Научную базу (**методологию и методы**) исследования составили методы системного анализа, методы структурного анализа, методы прикладной геоинформатики, методология моделирования систем с помощью UML, теория алгебраических систем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Понятийный аппарат в области обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе должен включать в себя определение понятия «большие пространственные данные», соответствующее как современному понятийному аппарату в области больших данных, так и понятию «пространственные данные», используемому в современной геоинформатике. Термин «поток пространственно-временных данных» должен быть формализован и должна быть определена его связь с понятием «большие пространственные данные».

2. Разработанная математическая модель процессов обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе для компьютерного моделирования геосистем в режиме реального времени позволяет свести проблему обеспечения непрерывности обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах в режиме реального времени к проблеме реализации пространственно-временных запросов монотонными операторами.

3. Разработанная система типов позволит упростить разработку программного и лингвистического обеспечения таких геоинформационных систем, гибко структурировать входные данные для выполнения пространственных запросов и надежно контролировать выполнение заданных спецификаций. Предложенная формализация может быть использована для обеспечения динамического моделирования явлений реального мира как результата обработки потоков пространственно-временных данных.

4. Методология обработки потоков пространственно-временных данных, обеспечивающая непрерывность их обработки, может быть компактно описана в виде некоторой концептуальной модели подсистемы геоинформационной системы, выполняющей обработку потоков пространственно-временных данных, состоящей из элементов, обеспечивающих реализацию процессов разрабатываемой методологии. В диссертации описаны процессы, методики, методы и алгоритмы, входящие в состав этой методологии.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования подтверждается тем, что:

- идеи, лежащие в основе исследования, базируются на анализе практики обработки пространственных и пространственно-временных данных в ГИС, а также обобщении передового опыта организации распределенных вычислений;

- теория обработки потоков пространственно-временных построена на известных, проверяемых фактах;

- при разработке математической модели непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС использованы доказанные математические результаты.

Основные положения диссертации докладывались и получили положительную оценку на:

1) VIII научно-практической конференции «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка. На рубеже веков», доклад: Матерухин А.В. «Возможные технологические подходы к обработке потоков пространственно-временных данных».

2) Международной конференции «Вычислительная и прикладная математика 2017», проводимая Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, доклад: Матерухин А.В. «Математическая основа обработки потоков пространственно-временных данных для динамического моделирования геосистем».

3) Международной конференции «1-я Неделя науки, технологий и инноваций «Геопространственные технологии и пространственные данные для экономики и безопасности России», доклады:

- Матерухин А.В., Майоров А.А. «Проблема создания высокотехнологичных масштабируемых геосервисов хранения и предоставления пространственной информации»,

- Матерухин А.В., Майоров А.А. «Теоретические основы создания приложений для операционной аналитики на основе обработки и анализа потоков пространственно-временных данных».

4) Тринадцатой международной азиатской Школе-семинаре «Проблемы оптимизации сложных систем» в рамках международной конференции IEEE SIBIRCON 2017, доклад: Матерухин А.В., Шахов В. В., Соколова О. Д. «Эффективный метод сбора пространственно-временных данных в беспроводной сети геосенсоров для мониторинга среды с использованием мобильных стоков».

Глава 1

Анализ проблемной ситуации и постановка задач исследования

Во Введении к настоящей работе уже была сформулирована цель настоящего исследования – разработка теоретических основ и методологии обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах. В качестве базового методологического подхода исследования был выбран системный подход, который является важнейшим методологическим направлением современной науки. В основе этого подхода лежит рассмотрение объектов исследования как систем, а исследование, использующее этот подход, должно быть направлено на выявление многообразных типов связей в этих системах и сведение их в единую теоретическую картину. Сущность и технологии применения системного подхода описаны в многочисленных научных публикациях, таких как [1,57,59].

Системный подход включает в себя целую совокупность приемов и методов, некоторые из которых имеют общесистемную применимость, а применимость других ограничивается определенной предметной областью. Методы системного анализа, являясь частью методов системного подхода, являются достаточно общими, чтобы их можно было применять в различных предметных областях, в том числе и в области настоящего исследования. Применение системного анализа предполагает соблюдение определенной последовательности этапов исследования, в частности, первыми двумя этапами исследования должны быть анализ проблемной ситуации и выделение набора задач исследования. Описанию этих двух этапов настоящего исследования посвящена эта глава.

1.1 Возникновение новой научной парадигмы «Больших данных» и ее влияние на геоинформатику

Как отмечается во многих работах последнего времени, например [69], современная способность человечества собирать все увеличивающееся количество данных не имеет прецедента в истории. Это увеличение количества собираемых данных вызывает значительные изменения методах и процедурах получения нового научного знания в различных предметных областях. В многих научных статьях, посвященных этому феномену, высказывается предположение о том, что мы входим в новую четвертую фазу развития науки, в которой уровень научного развития общества будет определяться не столько точными результатами наблюдений за природой отдельных ученых и не столько развитием теории, сколько возможностями использовать результаты этого нового изобилия данных. Обоснованию справедливости этого предположения посвящена, например, работа [98]. Формируется новая общенаучная парадигма, условно называемая в научной литературе парадигмой «Больших данных». В рамках этой новой парадигмы формируется новый понятийный аппарат и новые методы проведения научных исследований.

Поскольку большая часть этого все увеличивающегося количества собираемых данных снабжена или может быть снабжена указанием на местоположение в пространстве, то это изобилие данных затрагивает в первую очередь геоинформатику, которая отражает и изучает природные и социально-экономические геосистемы, их взаимодействие и развитие посредством компьютерного моделирования на основе информационных систем и технологий, баз данных и баз знаний. Задача проанализировать влияние новой общенаучной парадигмы «Больших данных» на геоинформатику в связи с этим становится весьма актуальной.

Вопросы такого влияния привлекают внимание исследователей по всему миру. Так в Европейском союзе в рамках общей программы Horizon 2020 действует научно-исследовательская программа Big Data Europe [71]. Поддерживаются исследования в следующих областях: потоковая обработка и анализ данных, потоковые сети сенсорных данных, геопространственная интеграция данных, мониторинг в режиме реального времени, крупномасштабная распределенная интеграция гетерогенных данных.

В OGC (Open Geospatial Consortium), который является международным консорциумом и в который входят более 400 компаний, правительственных агентств и университетов, участвующих в процессе согласования проектов разработки стандартов и требований к обработке геоинформационных данных, создана рабочая группа по большим данным BigData.DWG [72]. В задачи этой рабочей группы входит: прояснить основополагающую терминологию в контексте анализа больших пространственных данных, а также создать систематическую классификацию алгоритмов анализа, аналитических инструментов, данных и ресурсных характеристик. Особое внимание рабочая группа предполагает уделить потокам пространственно-временных данных от сенсорных сетей.

В РФ, в рамках Национальной технологической инициативы, также ведутся исследования в этой области. Росстандарт создал рабочие группы ТК 098/РГ3 «Большие данные», ТК 098/РГ2 «Разумный город», ТК 098/РГ1 «Интернет вещей».

Аналізу влияния новой общенаучной парадигмы «Больших данных» на геоинформатику и вопросам выработки соответствующего этой новой парадигме понятийного аппарата посвящена работа [18]. В ней автором настоящей работы предложено определение базового понятия «большие пространственные данные», которое соответствует как современному понятийному аппарату в области больших данных, так и понятию «пространственные данные», используемому в современной геоинформатике. Необходимость разработки базовых абстракций предметной области больших данных для формирования и унификации понятийного аппарата геоинформатики вызвана тем, что понятийный аппарат

всегда представляет собой совокупность понятий и категорий, образующих определенную систему. Важность формирования такой системы определяется тем, что сформированная система позволит не только на корректном уровне абстракции формулировать возникающие задачи обработки и анализа больших пространственных и пространственно-временных данных, но и предоставит необходимые для решения этих задач методологические инструменты.

Автором настоящей работы большие пространственные данные были определены как данные о пространственных объектах и их наборах, для которых их объемы, а также скорость накопления или особенности представления ограничивают эффективный анализ с помощью реляционного подхода.

Для определения понятия «большие пространственные данные» было проанализировано использование термина «большие данные» в научной литературе. Согласно [55] термин «большие данные» (в англоязычной литературе - Big Data) был предложен и введен в научный оборот Клиффордом Линчем, редактором журнала Nature, в 2008 году. С тех пор этот термин стал широко использоваться как в научной среде, так и за ее пределами. Согласно работе [100] большинство используемых в научной литературе определений термина «большие данные» можно разделить на три группы:

- атрибутивные определения,
- сравнительные определения,
- архитектурные определения.

Согласно первой группе определений (атрибутивные определения) к «большим данным» относятся наборы данных, обладающие наличием определенных атрибутов. Наиболее распространенная версия - это 4V (Volume, Variety, Velocity, Veracity):

- объем (Volume) – данные обладают большим объемом;
- разнообразие (Variety) – данные являются разнообразными как по своим источникам, так и по своей структуре;

- скорость накопления (Velocity) – объем этих данных растет с чрезвычайно высокой скоростью;

- достоверность (Veracity) – часть данных, которые могут быть недостоверными, не является пренебрежимо малой и ее нужно учитывать.

Примером такого определения может быть работа [88]. Примером определения, относящегося к этой группе, но не являющимся определением, основанном на 4V, может быть определение, основанное на 3C (Cardinality, Continuity, Complexity), предложенное в работе [150]:

- атрибут «мощность» (Cardinality), который в значительной мере соответствует атрибуту «объем» атрибутивном определении 4V и отражает количество записей в наборах данных, которые относятся к «большим данным»;

- атрибут «непрерывность» (Continuity), который отражает как непрерывный рост размера «больших данных» во времени, так и возможность их представления непрерывными функциями, появившуюся вследствие увеличившейся пространственной и временной детализации этих данных;

- атрибут «сложность» (Complexity), который отражает сразу три характеристики «больших данных» - разнообразие этих данных, большую размерность этих данных и необходимость высокой скорости обработки этих данных.

Несмотря на наглядность и интуитивную понятность этих определений они обладают большим методологическим дефектом, мешающим использовать их в качестве базовых. Недостатком атрибутивных определений является отсутствие каких-либо общепринятых метрик для определения значений атрибутов, что мешает использовать их как конструктивные определения.

Вторая группа используемых в научной литературе определений (сравнительные определения) определяет «большие данные» как такие наборы данных, которые из-за своего размера не могут быть получены, сохранены, а также обработаны и проанализированы с помощью типичного программного обеспечения для баз данных. Примером использования определения из этой

группы может быть работа [73]. Явным недостатком такого определения является необходимость уточнения понятия «типичное программное обеспечения для баз данных». Как представляется автору настоящей работы, достижение консенсуса по этому вопросу среди разработчиков баз данных является достаточно сложной задачей.

Согласно определению, относящемуся к третьей группе (архитектурные определения), к «большим данным» относятся наборы данных, для которых их объемы, а также скорость накопления или особенности представления ограничивают эффективный анализ с помощью реляционного подхода или требуют значительного горизонтального масштабирования для эффективной обработки. Примером использования определения из этой группы может быть работа [78]. Что именно понимается под значительным горизонтальным масштабированием в [78] не поясняется, поскольку, видимо, этот термин, с точки зрения авторов этой работы, представляется достаточно понятным и без дополнительных объяснений. С точки зрения автора настоящей работы, горизонтальное масштабирование становится значительным тогда, когда начинает уменьшаться масштабируемость вычислительной системы. Под масштабируемостью здесь понимается способность увеличивать производительность при добавлении ресурсов. Уменьшение масштабируемости при горизонтальном масштабировании вычислительной системы связано с ограничениями пропускной способности внутрикластерных соединений, дополнительной вычислительной нагрузкой на систему, связанной с управлением кластером, а также необходимостью дублировать ресурсы для обеспечения устойчивости к сбоям, число которых растет с увеличением количества устройств в составе системы.

Поскольку наиболее точным и сбалансированным подходом к определению понятия «большие данные» является определение, которое в вышеприведенной классификации относится к группе архитектурных определений, то именно оно было выбрано в качестве базы понятия «большие пространственные данные».

Таким образом, введенное понятие вполне соответствует современному понятийному аппарату в области больших данных.

Термин «пространственные данные», кодифицирующий содержание понятия «пространственные данные», является достаточно широко распространенным в современной геоинформатике и в настоящее время в научных статьях используется значительно чаще, чем ранее используемый термин «пространственно-координированные данные». Более широкому распространению этого термина способствует и его использование в законодательных и нормативных актах [3,45]. Согласно [3], пространственные данные – это «данные о пространственных объектах и их наборах». Таким образом, это введенное понятие «большие пространственные данные» соответствует и существующему в современной геоинформатике понятию «пространственные данные».

Поскольку в настоящее время в геоинформатике использование реляционных и объектно-реляционных баз является практически повсеместным и общим подходом при изучении геосистем, то возникает вопрос о существовании объекта, соответствующего введенному понятию «большие пространственные данные», то есть о существовании таких классов данных о пространственных объектах и их наборах, для которых их объемы, а также скорость накопления или особенности представления действительно ограничивают эффективный анализ с помощью реляционного подхода. Ниже один из таких классов данных будет описан – это потоки пространственно-временных данных, а также будут проанализированы ограничения использования реляционного подхода при обработке и анализе этого типа данных. Но вначале имеет смысл прояснить и определить понятие «обработка пространственных и пространственно-временных данных» в ГИС, что и будет сделано в следующем параграфе настоящей работы.

1.2 Обработка данных в ГИС

В монографии [10] были проанализированы основные понятия, относящиеся к методологии и технологии геоинформатики. В ней, в частности, показано, что с технологической точки зрения ГИС являются средством для получения из исходных данных результатов, к которым относится геоинформация, модели геопространства и пространственные решения, а также их картографические изображения. Геоинформация в этой работе определена как «упорядоченная совокупность координатной, топологической и атрибутивной информации о геопространстве и его объектах». Преобразование исходных данных, поступающих в ГИС, в геоинформацию собственно и составляет суть обработки данных в ГИС. Это преобразование связано с выполнением пространственных запросов к этим исходным данным и получением пространственных свойств объектов, которые связаны с этими данными. Анализ понятия «пространственные отношения» посвящено довольно много работ [7, 8, 11, 24, 25, 39,49]. Хороший обзор этой темы содержится в [53].

Но ГИС уже довольно давно используется не только для анализа статических пространственных свойств объектов, но и для их изучения этих свойств в динамике. Первая работа по этой теме [112] вышла еще в 1992 году. С тех пор вышло достаточно много работ, посвященных методам определения временных и пространственно-временных отношений между объектами и технологиям их реализации в ГИС: [157,158, 160, 161, 164, 165, 166]. Таким образом, в настоящее время в случае, если в исходных данных, поступающих в ГИС, содержатся данные не только пространственные, но и временные данные, то обработка уже представляет собой выполнение пространственно-временных запросов к исходным данным. Конкретный набор этих пространственно-временных запросов определяется определяемыми предметной областью задачами анализа полученной геоинформации для получения геознания. Анализ процессов

преобразования геоинформации в геознание в ГИС, а также анализ самого понятия «геознание» содержится в работах [2, 12, 15, 34, 38, 50, 51, 52, 54].

Для организации обработки данных на ранних этапах своего развития геоинформационные системы использовали свои собственные форматы файлов для хранения данных и неунифицированные интерфейсы для доступа к этим данным. Лишь в 90-х годах прошлого века большинство разработчиков программного обеспечения для ГИС начали использовать реляционные базы данных для обработки пространственных данных. К этому времени системы управления реляционными базами данных уже стали де-факто стандартом в области баз данных, но еще не использовались в геоинформатике. Задержка в использовании систем управления реляционными базами данных для разработки геоинформационных систем была связана с трудностями представления пространственных отношений между объектами средствами реляционных баз данных.

Реляционная база данных с математической точки зрения – это конечный набор конечных отношений произвольной арности над заранее определенными множествами элементарных данных.

Более формально: n -арным отношением Y на множествах A_1, A_2, \dots, A_n называется подмножество декартового произведения $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$, то есть

$$Y \subset A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n \quad (1.1)$$

Над отношениями можно осуществлять различные операции. В первоначальном варианте реляционной алгебры предложенной Коддом [77] этих операций было восемь: шесть бинарных операций (объединение, пересечение, разность, декартово произведение, соединение, деление) и две унарные (проекция и выборка). Коддом было определено это множество операций и доказано, что оно обладает свойством реляционной замкнутости, то есть результатом любой реляционной операции из этого множества будет некоторое отношение. Этих операций, как основы для построения запросов к данным, достаточно для

подавляющего большинства приложений, но не для выполнения пространственных запросов к пространственным данным.

Как было отмечено в [22], обработка пространственных данных обладает весьма существенной спецификой вследствие трудностей задания пространственных отношений между пространственными объектами в реляционной модели. Вот некоторые примеры пространственных отношений между объектами, которые было трудно смоделировать, используя базовую реляционную модель:

- топологические отношения (касается, находится внутри, перекрывает),
- отношения направления (севернее, южнее, слева, находится перед, находится за).

Причины этой сложности следующие:

Непространственные отношения между объектами являются явными и поэтому могут быть естественным образом быть представлены в виде некоторого подмножества декартового произведения множества объектов как в (1.1). Пространственные же отношения между объектами не являются явными и задание подобным образом отношений между объектами, вообще говоря, требует большого количества вычислений и, при выполнении «в лоб», может сделать достижение такого результата чрезвычайно затратным как с точки зрения времени, так и с точки зрения требующихся вычислительных ресурсов. Именно в силу специфики отражения пространственных отношений в реляционных базах данных для работы с пространственными были разработаны специальные пространственные индексы (R , $R+$, R^* - деревья, BSP -деревья, k -мерные деревья, quadro- и окто-деревья и многие другие).

В целях упрощения и унификации выполнения пространственных запросов реляционная модель была расширена с помощью пространственных абстрактных типов данных [92]. При этом подходе определяется набор пространственных типов данных и набор функций, которые работают с экземплярами этих типов данных. В качестве этого набора обычно выбирается набор типов данных и функции,

соответствующих стандарту OGC Simple Features Access [134]. Большинство современных СУБД поддерживают стандарты OGC Simple Feature Access для SQL [133] и ISO 13249 SQL / MM [146]. Например, PostGIS предоставляет различные типы данных для каждого стандарта, например, тип данных ST Geometry основан на спецификации ISO 13249 SQL / MM, тогда как тип данных Geometry следует спецификации OpenGIS Simple Feature Access для SQL.

Позже для реляционной модели были предложены различные расширения для того, чтобы поддерживать типы данных для геометрических объектов, изменяющихся со временем. Обзор исследований в этой области приведен в [94].

Таким образом, из приведенного выше в этом параграфе краткого обзора можно видеть, что в настоящее время для обработки пространственных и пространственно-временных данных в ГИС применяются системы управления реляционными базами данных, дополненные пространственными индексами и пространственными абстрактными типами данных.

Однако современные требования к непрерывной обработке потоков пространственно-временных данных в режиме реального времени уже не могут быть удовлетворены в рамках традиционного подхода с использованием систем управления реляционными базами данных. Обоснование этого утверждения и обсуждение связанных с этим проблем составляет содержание следующего параграфа настоящей работы.

1.3 Потоки пространственно-временных данных и проблемы, связанные с их обработкой

За последние два десятилетия был достигнут беспрецедентный прогресс в разработке малоразмерных сенсорных устройств, датчиков определения местоположения, недорогих, и небольших по размеру вычислительных платформ и в распространении повсеместного беспроводного доступа. Даже в самом начале этого технологического прорыва уже отмечалось его возможное влияние на науки о Земле [84].

В настоящее же время, как сказано в [126], широкое использование этих технологических разработок является одним из тех значительных технологических влияний, которые с высокой степенью вероятности будут воздействовать на геоинформатику. Благодаря этим новым возможностям сбора пространственно-временных данных интерес исследователей в области наук о Земле сместился со статического изучения геопространственных феноменов, при котором во внимание принимаются только статичные пространственные характеристики изучаемого явления, к более продвинутым средствам выявления динамически меняющихся пространственных отношений в исследуемых геосистемах. Технология получения пространственно-временных данных с помощью сенсорных систем предоставляет исследователям в области наук о Земле возможность получать данные с невозможной ранее пространственно-временной детализацией, а технический прогресс в этой области существенно удешевляет использование этих технологий.

Появление транспортных средств, которые могут автономно, без непосредственного участия человека в управлении движением, перемещаться в геопространстве - как на поверхности Земли, так и в воздухе или в воде увеличило возможности сбора пространственно-временных данных с помощью датчиков, передающих данные в режиме реального времени. Существует несколько уже использующихся типов таких автономных и полуавтономных транспортных

средств: беспилотные летательные аппараты, беспилотные автомобили. Каждое такое средство уже собирает пространственно-временные данные о своём постоянно меняющемся окружении и интерпретирует их в режиме реального времени для принятия навигационных решений, поэтому логично ожидать, что в ближайшем будущем эта функциональность, касающаяся сбора данных, будет расширена, и все больше пространственно-временных данных о природных и социально-экономических геосистемах будут собираться с помощью датчиков, установленных на этих транспортных средствах.

В последнее время, как было отмечено в работе [135], и обычные люди с помощью приложений, установленных на их смартфонах, также вносят большой вклад в сбор пространственно-временных данных. Волонтёры и проект «Citizen science» делают возможным сбор данных о геосистемах, которые трудно собрать другим способом.

Для обобщения всех этих новых источников пространственно-временных данных можно использовать понятие «геосенсор». Под термином «геосенсор» автор настоящей работы понимает устройство с возможностью определения своего местоположения и возможностями передачи данных в централизованную систему обработки, оборудованное датчиком (сенсором), которое предназначено для получения данных о событиях, для которых пространственный аспект собранных данных имеет существенное значение. Значимость пространственного аспекта собранных данных может проявляться по крайней мере на одном из следующих уровней:

- на уровне контента, то есть пространственный аспект может быть основным содержимым данных, собираемых датчиками (например, датчиками, регистрирующими движение или деформацию объектов);

- на уровне анализа, то есть сведения о местоположении датчиков могут обеспечить интегративный уровень для анализа собранных данных (например, для анализа пространственного распределения каких-либо параметров изучаемых геосистем).

Полезность использования такого инструмента увеличивается с увеличением количества используемых геосенсоров, поэтому имеет смысл говорить о технологиях сбора пространственно-временных данных не с помощью геосенсоров, а с помощью сетей геосенсоров. В научной литературе уже описано достаточно много примеров использования сбора данных с помощью сетей геосенсоров для изучения геосистем.

Работа [70] описывает применение этой технологии для изучения редких и находящихся под угрозой уничтожения видов растений в зоне вулкана.

Интересный проект [137], в котором система геосенсоров использовалась для исследования поведения ледников, выполнялся в 2010-2013 годах одним из ведущих научно-исследовательских вузов Великобритании Университетом Саутгемптона (University of Southampton). Исследование проводилось на двух ледниках: один в Норвегии, а другой в Исландии. Полученные научные результаты показали чрезвычайную полезность использования систем геосенсоров для моделирования геосистем, однако разработанная и примененная в ходе данного исследования методология рассчитана на достаточно ограниченное число используемых геосенсоров и не может быть произвольным образом масштабируема.

Сети геосенсоров могут быть особенно полезны при изучении распространения химических веществ, радионуклидов, вулканического пепла или патогенов в окружающей среде. Так в статье [140] утверждается, что возможности и доступность более дешевых, более чувствительных и сложных датчиков для газов, твердых частиц, определение качества воды, уровня шума и других измерений параметров окружающей среды позволяют исследователям собирать данные с беспрецедентной пространственной, временной и контекстной детальностью.

Различного рода пространственные модели давно используются в экологических исследованиях в качестве инструментов оценки и прогноза. Как правило, для создания этих моделей используются либо данные, получаемые от

немногих и, как правило, довольно далеко расположенных друг от друга, станций регулярного экологического мониторинга, либо данные, которые были получены в результате дорогостоящих краткосрочных полевых исследований. Иными словами, данные, используемые для создания таких моделей, могут быть охарактеризованы как имеющие либо низкое пространственное разрешение, либо существенно ограниченный временной охват. Это является большим недостатком для данных в случае построения пространственной модели загрязнения воздуха в крупных городах.

Как отмечено в работах [115, 154] для мониторинга загрязнения воздуха в гетерогенных средах, таких как городская среда, которые характеризуются наличием большого количества различных источников загрязняющих выбросов, требуется производить измерения с большим пространственным и временным разрешением. Пространственно-распределенные геосенсоры позволяют наблюдать за окружающей средой с нужной степенью пространственного и временного разрешения и автоматически передавать полученные данные через сетевую инфраструктуру в системы обработки и анализа таких данных.

В работе [116] для построения модели загрязнения воздуха в городской среде предлагается использовать носимые устройства со встроенными газовыми сенсорами. Исследование, проведенное с помощью таких устройств, подтверждает, что городская среда действительно характеризуется высокой изменчивостью концентраций атмосферных загрязнителей как в пространстве, так и во времени. Сети геосенсоров потенциально могут снять ограничения традиционного экологического мониторинга в районах с большими пространственно-временными вариациями концентраций загрязняющих веществ, а также в сельских районах и развивающихся странах, где традиционные системы экологического мониторинга в настоящее время не слишком распространены.

В статье [40], написанной с участием автора настоящей работы, описывается исследование возможности создания в режиме реального времени пространственной модели загрязнения воздуха в городе Москва на основе

использования потоков пространственно-временных данных от сетей геосенсоров. Поскольку городская среда в крупных городах вообще, и в Москве в частности, характеризуется наличием большого количества различных источников выбросов и быстро протекающими процессами распространения загрязнений, то для построения адекватной пространственной модели требуется производить измерения с большим пространственным и временным разрешением. В статье показано, что сети геосенсоров предоставляют исследователям возможность получать данные с необходимой пространственно-временной детализацией.

Можно заметить, что во всех примерах, описанных выше, использование данных от сетей геосенсоров для моделирования и изучения поведения геосистем тем эффективнее, чем выше уровень пространственно-временной детализации поступающих данных. Однако, это увеличение пространственно-временной детализации приводит к росту интенсивности потоков данных (под которой в настоящей работе понимается количество элементов потока данных, поступающих в систему обработки за единицу времени). Такое увеличение интенсивности потоков пространственно-временных данных приводит на определенном уровне интенсивности этих потоков к невозможности непрерывной обработки данных, поступающих в геоинформационную систему, использующую системы обработки пространственно-временных данных на основе систем управления реляционными базами данных.

Для того, чтобы придать большую четкость и однозначность понятию «обработка потоков пространственно-временных данных», используемому в настоящей работе, и указать функциональность, соответствующую набору процессов в ГИС, который соответствует этому понятию, необходимо задать общую модель потоков данных в обобщенной ГИС, предназначенной для мониторинга различных процессов в геосистемах в режиме близком к реальному времени.

На Рисунке 1.1 с использованием графической нотации диаграммы потоков данных показано место и функции процессов обработки пространственно-

временных данных в обобщенной ГИС, предназначенной для мониторинга различных процессов в геосистемах в режиме близком к реальному времени, по отношению к процессам сбора пространственно-временных данных о геосистеме и процессам геоинформационного анализа.

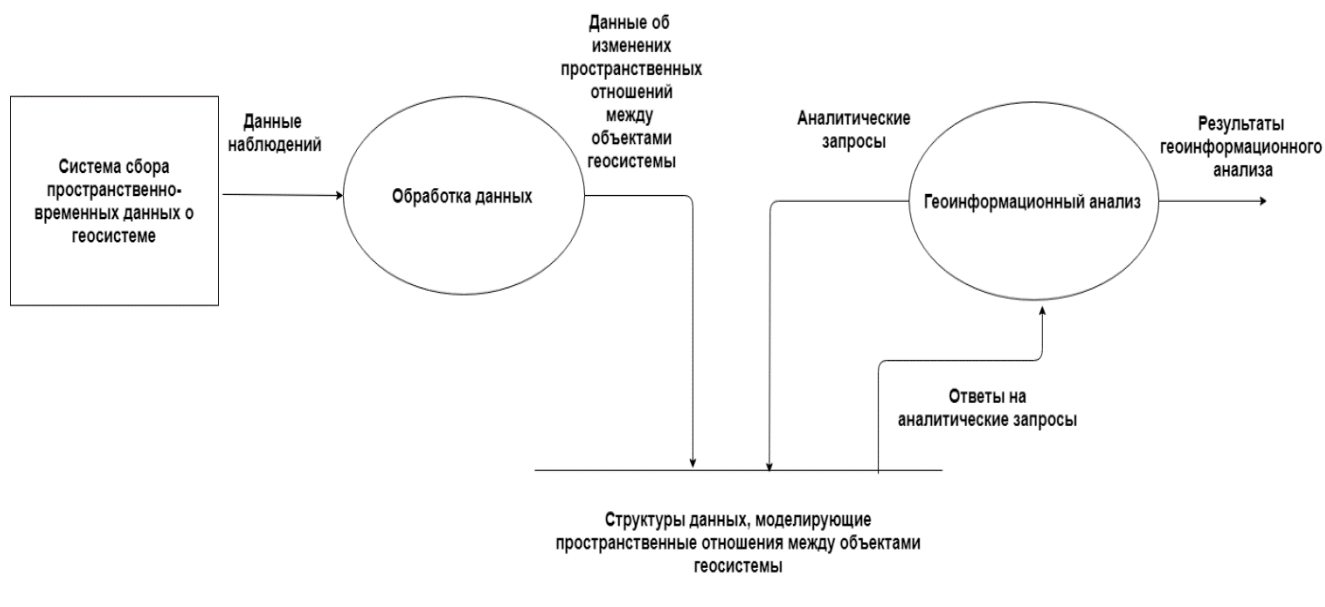


Рисунок 1.1 Место и функции процессов обработки пространственно-временных данных в обобщенной ГИС, предназначенной для мониторинга процессов в геосистемах

Под непрерывностью обработки, понимаемой в вышеописанном смысле, неформально говоря, понимается такое свойство процесса обработки как возможность выдачи ответа этим процессом сразу после поступления очередного элемента данных. Непрерывность обработки данных поступающих от систем геосенсоров в случае обеспечения этого свойства системой их обработки сделало бы возможным не только осуществление мониторинга различных процессов на поверхности Земли в режиме близком к реальному времени, но и создало бы принципиальную возможность разработки приложений операционной аналитики на основе обработки и анализа потоков пространственно-временных данных,

получаемых от различных систем сбора таких данных. Приложения операционной аналитики — это интегрированные автоматические процессы принятия решений, предписывающие и реализующие действия в пределах «времени принятия решения». Результаты традиционных аналитических процессов используются для принятия решений или вводятся в процесс принятия решений человеком или группой людей. В случае же операционной аналитики аналитический процесс и действия на основе проведенного анализа осуществляются в автоматическом режиме, без участия человека. Это предъявляет совершенно особые требования к процессам обработки и анализа пространственно-временных данных в таких приложениях, которым, к сожалению, не удовлетворяют современные методы обработки пространственно-временных данных в ГИС.

Невозможность обеспечить непрерывность обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС, использующих системы обработки на основе систем управления реляционными базами данных, вызвана двумя причинами: с одной стороны - это несоответствие объекта обработки (потоков пространственно-временных данных) реляционной модели, а с другой стороны — это несоответствие требований к непрерывности обработки модели «обработка после сохранения». Более подробно эти причины разбираются ниже.

Неформально говоря, поток данных — это последовательность упорядоченных (по временной отметке или по порядку поступления) элементов данных, поступающих от источника данных в режиме реального времени. Отдельные элементы потока имеют одинаковую структуру и могут описаны некоторой схемой, также как кортежи в реляционной модели. Таким образом, поток данных от источника можно формально представить, как некоторую упорядоченную последовательность кортежей.

Специфика потоков данных, выводящая их, вообще говоря, за пределы реляционной модели, как было указано автором настоящей работы в статье [30], следующая:

1. Потоки данных представляют собой последовательность кортежей, упорядоченных по времени прибытия или по другим атрибутам, например, таким как, например, время генерации этих данных внешним источником. Эти атрибуты, конечно, будут коррелировать со временем прибытия, но не обязательно будут ему эквивалентны. Эти кортежи поступают для обработки в течение некоторого времени, а не являются доступными изначально.

2. Элементы потока получают от различных внешних источников, а это означает, что система управления, вообще говоря, не имеет возможности управлять порядком прибытия или скоростью передачи элементов потока.

3. Элементы потока поступают в общем случае без каких-либо перерывов и, следовательно, представляют собой неограниченную последовательность, или, по крайней мере, такую последовательность, длина которой неизвестна. Таким образом, система управления не может знать, если и когда поток «закончится».

4. После обработки элемента потока данных он исключается из потока или архивируется. При этом, если требуется оставить возможность дальнейшего обращения к нему, то его нужно сохранять в памяти, которая, если рассматривать общий случай, имеет намного меньший размер, чем размер потока данных в целом.

Основные противоречия базовым предположениям реляционной модели:

- для набора кортежей, представляющего собой поток данных, порядок значим и должен учитываться в модели;
- набор кортежей потенциально бесконечен.

Следует добавить, что традиционные СУБД используют модель обработки данных типа «обработка после обязательного сохранения». Это означает, что данные сначала сохраняются в базу данных (причем, в случае пространственно-временных данных еще и перестраивается соответствующий пространственный индекс), а запрос применяется к текущему моментальному снимку базы данных.

Использование такой модели обработки в схематичной форме изображено на Рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 Модель «обработка после обязательного сохранения»

При реализации обработки потоков пространственно-временных данных на основе систем управления реляционными базами данных входящие кортежи потока данных сохраняются в базе данных и после этого к базе данных применяется некоторый пространственный запрос. Такой подход требует, чтобы потоки данных сохранялись на дисковых запоминающих устройствах, то есть на устройствах со сравнительно высокой задержкой при доступе к ним, прежде чем они смогут быть доступны для запроса и обработки в оперативной памяти. Несоответствие между высокой задержкой дискового хранилища и низкой задержкой оперативной памяти значительно увеличивает времени обработки, что приводит в случае превышения интенсивности потока определенной величины к постоянному росту времени

запаздывания ответа. Для того чтобы оценить масштаб проблемы, достаточно сказать, что считывание одного 32-разрядного слова из оперативной памяти согласно [44] происходит примерно в миллион раз быстрее, чем с жесткого диска.

К сожалению, большинство из используемых в настоящее время технологий для обработки пространственно-временных данных в ГИС полагаются на предположение о том, что все входящие пространственно-временные данные могут храниться на диске. Для доказательства этого утверждения можно сослаться на работы [101, 102, 106, 107, 109, 111, 113, 122, 123, 138, 149, 151, 162]. Хотя это допущение справедливо для определенных размеров данных и скорости поступления данных, это может оказаться невозможным для высоких скоростей прибытия этих данных и (или) массивных размеров данных. При обработке потоков данных высокой интенсивности возможны только решения в памяти, а ведь именно использование потоков данных высокой интенсивности может привести к новым качественным изменениям в моделировании геосистем, сделав возможным изучение происходящих в них явлений на значительно более детальном уровне.

Моделирование в режиме реального времени природных и социально-экономических геосистем с помощью ГИС, использующей обработку потоков пространственно-временных данных от сетей геосенсоров, направлено на:

- понимание динамики изучаемой геосистемы;
- раннее обнаружение и возможное реагирование на происходящие в геосистеме изменения.

В перспективе возможно и решение такой задачи, как автоматическое поддержание устойчивости социально-экономической геосистемы посредством использования операционной аналитики.

Как уже говорилось ранее, эффективность такого моделирования возрастает с ростом уровня пространственно-временной детализации поступающих данных, при условии обеспечения непрерывности обработки этих потоков данных. В настоящее время эффективность моделирования геосистем с помощью ГИС,

использующей обработку потоков пространственно-временных данных от сетей геосенсоров, ограничена вследствие невозможности обеспечить непрерывность обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах (ГИС) в режиме реального времени.

Таким образом, можно констатировать, что высокая интенсивность потоков пространственно-временных данных делает невозможными их эффективную обработку и анализ с помощью реляционного подхода, тем самым переводя их согласно предложенному в первом параграфе настоящей статьи определению в разряд «больших пространственных данных». Это делает необходимым проведение анализа возможной применимости технологических подходов, разработанных в рамках парадигмы «больших данных», к решению выявленной проблемы обеспечения непрерывности обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах (ГИС) в режиме реального времени, поскольку геоинформатика – это не первая предметная область, которая столкнулась с проблемой обеспечения непрерывности обработки интенсивных потоков данных.

В работах [14, 17, 19, 117] были проанализированы возможные технологические подходы к обработке потоков пространственно-временных данных. Действительно, в качестве ответа на неспособность систем управления реляционными базами данных справляться с интенсивными потоками данных в технологическом стеке новой научной парадигмы больших данных уже была разработана новая технология – системы управления потоками данных (СУПД). Эта технология (как, собственно, и первые прототипы систем, относящихся к этому новому классу) была разработана в ходе выполнения нескольких исследовательских проектов американских университетов. Это проект TelegraphCQ, который выполнялся в Калифорнийском университете в Беркли (University of California, Berkeley) [152]; совместный проект Aurora Массачусетского технологического института (Massachusetts Institute of Technology, MIT), Брауновского университета (Brown University) и Университета

Брендэйса (Brandeis University) [68], а также проект STREAM Стэнфордского университета (Stanford University) [148].

Примерами современных систем, основанных на этой идее, и уже используемых для создания промышленных решений, являются: TIBCO Streambase, Apache Storm, Microsoft Streaminsight, IBM Infosphere.

В работах [17, 117] автором настоящей работы произведен сравнительный анализ моделей обработки данных поступающих от систем сбора данных в СУБД и СУПД.

На Рисунке 1.3 в схематичном виде показана модель обработки данных, основанная на технологии использования СУБД. Поступающие данные от датчиков (сенсоров), обозначенные на схеме как **D**, передаются для записи в реляционную базу данных, обозначенную на схеме как **RDB**, и становятся после этого доступными для запросов и анализа с помощью запросов **Q**. Для увеличения скорости записи данных в базу используется буферизация в оперативной памяти, которая обозначена на схеме как **MM**. Выходные данные (результаты обработки) обозначены на схеме как **O**.

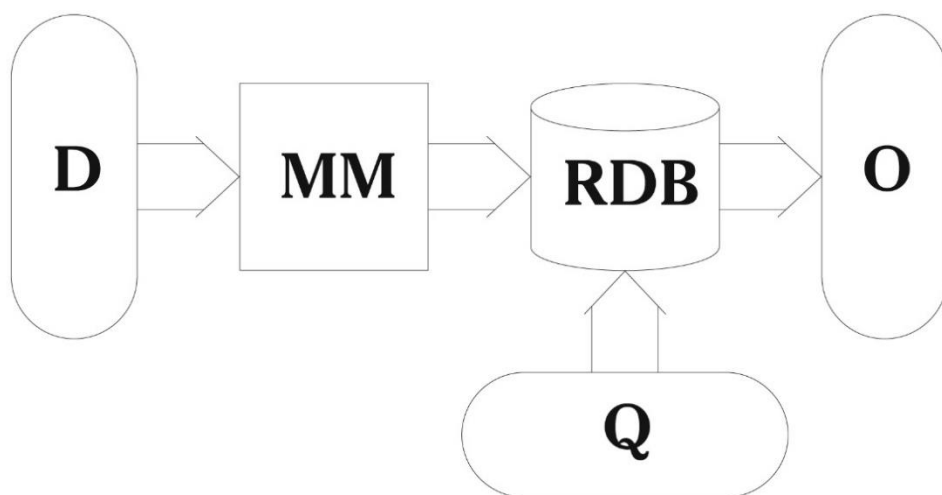


Рисунок 1.3 Модель обработки данных, основанная на технологии использования СУБД

Большим достоинством этого варианта обработки является то, что данные, поступающие от системы сбора данных в режиме реального времени, «бесшовно» интегрируются с более ранними данными, что делает возможным выполнение аналитических запросов с использованием как данных реального времени, так и исторических данных. Кроме того, использование этой технологии обеспечивает выполнение полного набора требований ACID (англоязычный акроним Atomicity, Consistency, Isolation, Durability - атомарность, непротиворечивость, изолированность, сохранность данных) по отношению к записываемым в базу данным, что является важным для многих предметных областей.

Первый недостаток, который связан с использованием этой технологии, - это физические ограничения на интенсивность потока данных, которая может быть обработана ГИС, использующей систему управления реляционной базой данных. Поскольку данные, поступающие от датчиков (сенсоров), передаются для записи в базу данных, которая хранится на жестком диске, то ограничителем выступает такая характеристика жесткого диска как время произвольного доступа. Использование твердотельных накопителей позволяет улучшить эту характеристику, но не изменить это ограничение существенным образом.

Второй недостаток – это «одноразовость» выполнения запроса: запрос инициируется системой или пользователем и применяется к некоторому набору данных, частота выполнения запроса никак не связана с частотой изменений в этом наборе.

Системы управления потоками данных разработаны, чтобы преодолеть эти недостатки. На Рисунке 1.4 в схематичном виде показана модель обработки данных, основанная на технологии использования СУПД.

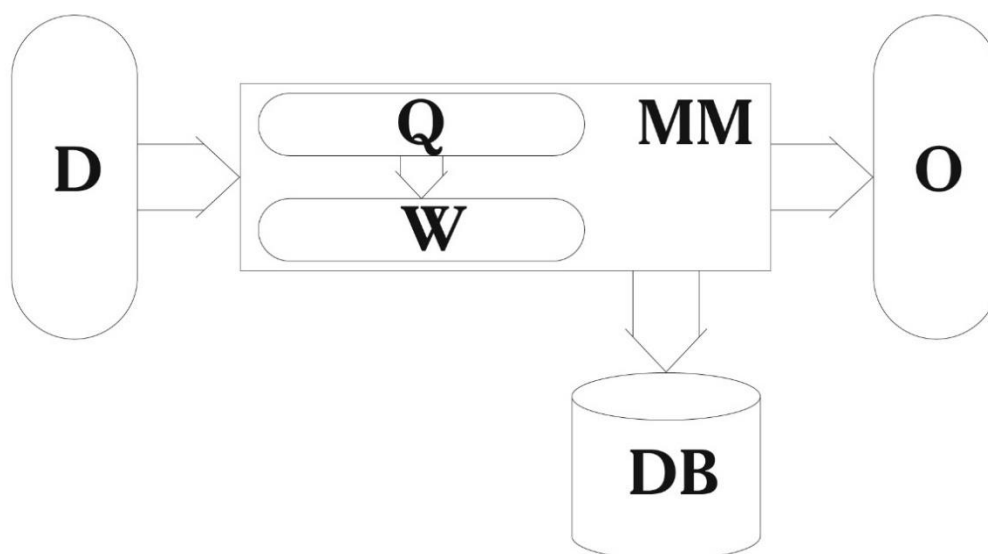


Рисунок 1.4 Модель обработки данных, основанная на технологии использования СУПД

При помощи операторов окна потоки данных прямо в оперативной памяти, обозначенной на схеме как **MM**, преобразовываются в таблицы, обозначенные на схеме как **W**, к которым применяются запросы, обозначенные на схеме как **Q**. Данные, выходящие за пределы окна, могут быть архивированы в базе данных, обозначенной на схеме как **DB**. Эта база не обязательно должна быть реляционной. Выходные данные (результаты обработки) обозначены на схеме как **O**.

Ограничение, которое следует непосредственным образом из такого подхода, заключается в том, что запросами **Q** обрабатываются только те данные, которые попали в соответствующее окно.

Преимуществом же, отличающим СУПД от СУБД является непрерывное выполнение заданного алгоритма обработки. Как уже было замечено ранее, в СУБД сначала данные поступают в базу данных и сохраняются там, а потом система направляет к этим сохраненным данным запросы. В СУПД запросы поступают раньше, чем данные. Данные проходят через несколько постоянно выполняемых запросов, и обработанные данные поступают в соответствующие приложения. Данные обрабатываются в оперативной памяти, без обращения к диску, что

обеспечивает высокое быстродействие и низкую задержку при обработке. Дополнительным плюсом СУПД является то, что они в отличие о СУБД, с самого начала проектировались для реализации в условиях вычислительного кластера, что сразу обеспечивает легкость горизонтального масштабирования.

Во многих предметных областях, где возникла необходимость непрерывной обработки потоков данных (например, в обработке потоков финансовых данных), уже произошел переход от систем управления базами данных к системам управления потоками данных. В геоинформатике такого перехода до сих пор не произошло. Это связано с тем, что у всех вышедших за пределы исследовательских проектов и готовых к промышленному использованию систем управления потоками данных есть общая черта – отсутствие как полноценной поддержки пространственных и пространственно-временных типов данных, так и средств выполнения пространственных запросов к ним, за исключением самых примитивных. В качестве подтверждения этого тезиса можно обратиться к работам [97, 128].

Дело в том, что методы выполнения запросов к потокам непространственных данных будут отличаться от методов выполнения запросов к потокам пространственно-временных данных тем, в частности, что значимым составным элементом как выполняемого пространственного запроса, так поступающих на вход пространственно-временных данных, является указание на местоположение, которое может постоянно изменяться в ходе непрерывного выполнения запроса и, поэтому модель потока пространственно-временных данных будет достаточно существенно отличаться от модели потока непространственных данных. Существующие же методы и алгоритмы выполнения пространственных и пространственно-временных запросов разрабатывались для реляционных баз данных с предварительно построенными пространственными индексами, а не для потоков и не для выполнения в среде СУПД.

Для исследовательских проектов, рассмотренных в Главе 4 настоящей работы и в программном обеспечении которых реализована часть необходимой

функциональности, нет общих решений на единой методологической основе, которые бы обеспечивали непрерывность обработки пространственно-временных данных в ГИС, построенных с использованием программного обеспечения, созданного в ходе этих исследовательских проектов.

Можно заметить, что ситуация с системами управления потоками данных в настоящее время в некотором смысле аналогична ситуации с системами управления реляционными базами данных в конце прошлого века до разработки соответствующих пространственных индексов и эффективных алгоритмов выполнения пространственных запросов с использованием этих индексов. Суть этой схожести – в отсутствии разработанных теоретических основ и методологии для обработки пространственно-временных данных с возможностью выполнения пространственных запросов к этим данным в системах управления потоками данных.

Итак, в результате проведенного анализа проблемной ситуации было выявлено, что существующую эффективность моделирования геосистем можно повысить, если обеспечить непрерывную обработку интенсивных потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах (ГИС) в режиме реального времени.

Непрерывность обработки пространственно-временных данных поступающих в ГИС от систем сбора данных предполагает, что непрерывные запросы на определение пространственных отношений работают потенциально неограниченно долго на потенциально неограниченном наборе данных и учитывают временный порядок входящих данных. Дополнительно необходимо обеспечить низкую задержку и учитывать возможные изменения в интенсивности поступающих данных.

Таким образом, суть проблемы обеспечения непрерывности обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах (ГИС) в режиме реального времени заключается в том, что необходимо обеспечить независимость времени выполнения пространственных запросов к входящим

потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков. Независимость времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков даст возможность масштабирования интенсивности этих потоков.

Многие исследователи считают, что именно невозможность такого масштабирования интенсивности потоков является основным препятствием на пути широкого использования потоков пространственно-временных данных от систем геосенсоров. Например, по мнению авторов статьи [90], наиболее важной текущей проблемой в этой области является проблема разработки моделей пространственно-временных данных, которые бы соответствовали потребностям ГИС, обрабатывающей в режиме реального времени неограниченно масштабируемые потоки пространственно-временных данных.

Высокий интерес к исследованиям в этой области демонстрирует и выпущенный в 2015 году Группой по пространственной информации Ассоциации вычислительной техники (Special Interest Group on Spatial Information of the Association for Computing Machinery (ACM) – SIGSPATIAL) сборник докладов, посвященный сетям геосенсоров [143]. В статье [125] из этого сборника в числе наиболее актуальных нерешенных задач, стоящих перед исследователями в этой области указаны:

- задачи, связанные с управлением потоками пространственно-временных данных от сети геосенсоров (в частности, проблема обработки неограниченно масштабируемых потоков пространственно-временных данных от сети геосенсоров);

- задачи анализа пространственно-временных данных от сети геосенсоров.

Самые последние исследовательские работы этой области [69, 89,91, 108, 120] прямо утверждают, что геоинформатика нуждается в разработке алгоритмов и методов для непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в реальном времени. Применяющиеся сейчас методы и алгоритмы обработки пространственных и пространственно-временных данных, разработанные в конце

1980-х и первой половине 1990-х годов, были разработаны в предположении «все данные доступны до начала процесса обработки», что весьма ограничивает полезность и применимость этих методов и алгоритмов для обработки потоков данных. В тоже время сложность пространственных и пространственно-временных отношений делает уже разработанные методы для обработки потоков непространственных данных тоже не слишком полезными и применимыми для эффективной обработки потоков пространственно-временных данных.

Таким образом, можно констатировать, что современное требование к процессу обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС, выполнение которого позволяет повысить эффективность моделирования геосистем, заключается в том, что необходимо разработать методологию обработки, которая сможет обеспечить независимость времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков. Предварительным этапом разработки такой методологии должна стать разработка необходимых теоретических основ обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС.

1.4 Краткие выводы по Главе 1

В результате проведенного анализа проблемной ситуации было определено, что существующую эффективность моделирования геосистем можно повысить если обеспечить непрерывную обработку интенсивных потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах (ГИС) в режиме реального времени. В результате дальнейшего анализа этого подхода к повышению эффективности моделирования геосистем выявлена и проанализирована проблема обеспечения непрерывности обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах (ГИС) в режиме реального времени.

Выявленная проблема имеет важное социально-экономическое значение. Социально-экономическое значение этой проблемы состоит в том, что в случае ее решения становится возможной разработка эффективных систем сбора, обработки и предоставления потребителям геоинформации в режиме реального времени, обеспечивающих потребности государства, бизнеса и граждан в актуальной и достоверной информации о пространственных объектах.

Было показано, что одной из основных задач, входящих в набор задач, решение которых необходимо для устранения проблемы обеспечения непрерывности обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах (ГИС) в режиме реального времени, является задача обеспечить независимость времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков. Независимость времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков дает возможность масштабирования интенсивности этих потоков.

Во многих предметных областях, где возникла необходимость непрерывной обработки потоков данных (например, в обработке потоков финансовых данных), уже произошел переход от систем управления базами данных (СУБД) к системам

управления потоками данных (СУПД), в которых используется модель «обработка без обязательного сохранения». В геоинформатике такого перехода до сих пор не произошло. Причина такого положения дел состоит в том, что используемая в настоящее время в ГИС методология обработки пространственных и пространственно-временных данных разрабатывалась на теоретической основе реляционной алгебры, дополненной пространственными индексами и абстрактными типами пространственных и пространственно-временных данных, а также использовании модели «обработка с обязательным предварительным сохранением», предназначенной для работы с дисковой памятью, а для непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных необходимо разработать новые теоретические основы такой обработки и основанную на них методологию обработки.

Основные требования, которым должна удовлетворять эта новая методология:

- обеспечивать непрерывность обработки потенциально неограниченных потоков пространственно-временных данных, поступающих от многочисленных источников, то есть необходимо обеспечить независимость задержки получения результатов обработки от возможных изменений интенсивности поступающих данных;

- учитывать необходимость использования только решений в памяти для уменьшения задержки обработки;

- необходимо обеспечить расширяемость процесса обработки, то есть способность легкого изменения количества и состава выполняемых запросов к поступающим потокам пространственно-временных данных;

- необходимо обеспечить масштабируемость процесса обработки, то есть способность увеличивать производительность при добавлении ресурсов.

Была определена исследовательская программа, которую необходимо выполнить для решения выявленной проблемы, а именно – разработка

теоретических основ и методологии обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС.

Описание выполнения этой исследовательской программы и полученных при этом результатов составляет содержание следующих глав настоящей работы.

Глава 2

Теоретические основы обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе

Согласно результатам проведенного в Главе 1 настоящей работы анализа существующей в настоящее время в геоинформатике проблемной ситуации, заключающейся в существовании объективного противоречия между новыми технологическими возможностями сбора пространственно-временных данных и отсутствием соответствующих технологических возможностей для непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных с возможностью выполнения пространственных запросов к этим данным в режиме реального времени, для решения выявленной проблемы необходимо выполнение соответствующей исследовательской программы а именно – разработки теоретических основ и методологии обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС.

Необходимыми этапами процесса разработки теоретических основ обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС являются следующие:

- анализ возможных представлений данных измерений и наблюдений в системах сбора пространственно-временных данных, из которых эти данные могут поступать в ГИС, с учетом новых технологических возможностей сбора пространственно-временных данных с любой необходимой степенью пространственно-временной детализации, о которых говорилось в Главе 1 настоящей работы;

- разработка математической модели процессов непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе с возможностью выполнения пространственных запросов к этим данным в режиме реального времени;

- разработка системы типов пространственно-временных данных, соответствующих требованиям непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе с возможностью выполнения пространственных запросов к этим данным в режиме реального времени.

Далее в этой главе описаны результаты выполнения этих этапов разработки теоретических основ обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС.

2.1 Представление данных измерений и наблюдений в современных системах сбора пространственно-временных данных

В Главе 1 настоящей работы уже было отмечено, что новые технологические возможности сбора пространственно-временных данных с любой необходимой степенью пространственно-временной детализации связаны с появлением и развитием сетей геосенсоров. Сеть геосенсоров уже определялась автором ранее в Главе 1 как распределенная сенсорная сеть, которая предназначена для получения данных о событиях, для которых пространственный аспект собранных данных имеет существенное значение. Используемый в этом определении, в качестве родового понятия, термин «распределенная сенсорная сеть» в настоящее время является уже вполне устоявшимся термином, обозначающим распределенную сеть из интеллектуальных датчиков с поддержкой сетевых коммуникационных протоколов. Вообще говоря, этот термин не подразумевает какого-либо единого стандарта на сетевой коммуникационный протокол или стек протоколов, однако, в настоящее время существует тенденция к использованию стека протоколов TCP/IP для обеспечения передачи данных из распределенных сенсорных сетей во внешние по отношению к ним сети. Эта тенденция основана на концепции интернета вещей (в англоязычной литературе для обозначения этой концепции используется аббревиатура IoT) [155], в которой интеллектуальные датчики играют значительную роль. Например, в работе [110] интеллектуальные датчики рассматриваются как базовые строительные блоки для создания интернета вещей. Эволюция концепции интернета вещей привела к появлению более узкого понятия «веб вещей» (в англоязычной литературе для обозначения этого понятия используется аббревиатура WoT), которое описывает ситуацию, когда для связи между различными узлами Интернета вещей используются веб-протоколы [76]. Это означает, что в качестве базового протокола для связи с системой обработки данных используется протокол HTTP и данные передаются через сеть Интернет.

Существует два популярных подхода к использованию веб-протоколов: подход REST [85,86] и подход, связанный с использованием протокола SOAP [47]. Эти подходы, вообще говоря, довольно сильно отличаются друг от друга.

Исторически более ранний подход, связанный с использованием протокола SOAP, использует для записи передаваемых сообщений формат XML. Подход REST делает акцент на более простых форматах данных чем XML, применении URL для идентификации ресурсов и использовании возможностей HTTP для аутентификации и согласования типа контента между источником и получателем сообщения. Подход REST становится все более популярным по сравнению с подходом, связанный с использованием протокола SOAP [124]. Спецификации, спроектированные в соответствии с принципами REST, называют воплощающими REST (в англоязычных научных статьях используется термин RESTful).

Поскольку при реализации современных систем сбора пространственно-временных данных используется как тот, так и другой подход, то необходимо проанализировать варианты представления пространственно-временных данных в сообщениях, передаваемых от сети геосенсоров в систему обработки, как при одном так и при другом подходе.

Open Geospatial Consortium (OGC) в целях поддержки и развития концепции «веб вещей», являясь наиболее значимой организацией в области разработки открытых спецификаций для геопространственных данных и геопространственных сервисов, разработал набор спецификаций для реализации как одного, так и другого подхода.

Для реализации подхода, связанного с использованием протокола SOAP, был разработан набор спецификаций Sensor Web Enablement (SWE) [131].

В состав этого набора, в частности, входят следующие спецификации:

- стандартные модели и XML-схемы для данных, передаваемых геосенсорами (спецификация Observations & Measurements, O & M);
- стандартные модели и XML-схемы для систем геосенсоров и процессов получения ими данных (спецификация Sensor Model Language, SensorML);

- описание интерфейса для запросов, фильтрации и получения данных от систем геосенсоров, включающих в себя дистанционные, стационарные и мобильные датчики (спецификация Sensor Observations Service, SOS);

- описание интерфейса для веб-сервиса, с помощью которого клиентское приложение может определить наличие возможности получить данных от датчиков и подписаться на получение этих данных (Sensor Planning Service, SPS).

Реализация спецификаций SWE позволяет обнаруживать, получать доступ и использовать геосенсоры и сети геосенсоров. Многие производители оборудования и программного обеспечения для создания сети геосенсоров реализуют эти спецификации. Известная реализация, например, выполнена исследовательским центром 52°North GmbH из Германии [142].

С точки зрения задачи, вынесенной в заголовок настоящего параграфа, а именно – анализа возможных представлений данных измерений и наблюдений в современных системах сбора пространственно-временных данных, особенное место занимает спецификация [130] - она же является стандартом ISO ISO 19156:2011 и опубликована в ее текущем виде в 2013 году. Текст этой спецификации подготовлен совместно Open Geospatial Consortium (OGC) и Техническим комитетом ISO/TC 211 «Географическая информация/Геоматика». Эта спецификация определяет концептуальную схему наблюдений и особенности, связанные с выборкой при проведении наблюдений, а также обеспечивает модели для обмена результатами как внутри одной системы, так и между системами. Спецификация определяет видимые интерфейсы и не ограничивает базовые реализации. Понятийный аппарат, используемый в тексте следующий:

Формулируется соотношение между понятиями «наблюдение» и «измерение». Более общим понятием устанавливается «наблюдение», поскольку его результатом может быть не только числовое значение. Понятие «измерение» считается включенным в состав понятия «наблюдение» и используется для случаев, когда результатом является некоторое число.

Наблюдение определяется как действие, связанное с дискретным моментом времени или с периодом, и которое присваивает наблюдаемому явлению определенное число, категорию или символ. Это действие также связано с применением определенной процедуры, которой может являться применение некоторого датчика, инструмента, выполнение некоторого алгоритма или выполнение цепочки процессов. Результатом наблюдения является оценка значения свойства некоторого объекта.

Использование общей модели позволяет однозначно объединять данные наблюдений с использованием разных процедур. Основная идея заключается в том, что результатом наблюдения является оценка значения некоторого свойства объекта, представляющего интерес, а другие свойства наблюдения предоставляют контекст или метаданные для поддержки оценки, интерпретации и использования результата. Само наблюдение также считается объектом, поскольку оно обладает некоторыми свойствами и идентичностью. Сведения о наблюдении могут быть использованы для оценки качества данных.

На Рисунке 2.1 представлена общая модель наблюдения как объекта в виде диаграммы UML. Изображенная общая модель наблюдения полностью соответствует [130].

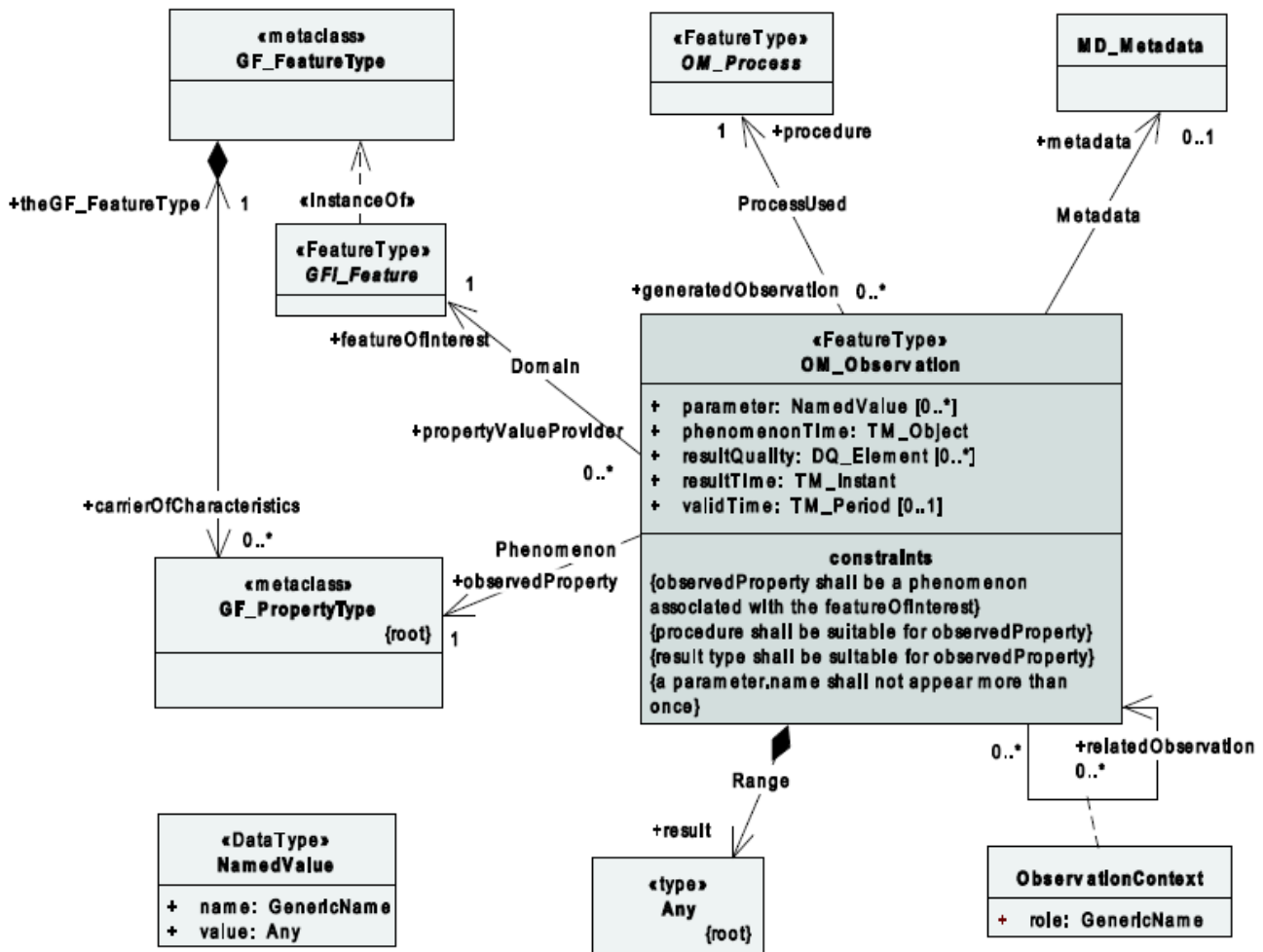


Рисунок 2.1 Общая модель наблюдения

В общей модели наблюдения, представленной на Рисунке 2.1 не обозначено местоположение, представляющее интерес с точки зрения результата наблюдения, и которое обычно связано с объектом наблюдения. В спецификации [130] в связи с этим указывается, что значение местоположения, представляющее интерес с точки зрения результата наблюдения, и которое указывается при выдаче этого результата, может определено в результате совершенно различных процедур.

Так, например, например, в приложениях дистанционного зондирования для геопривязки сцены требуется сложная цепочка обработки, а в других приложениях процедура может включать в себя некоторый датчик, расположенный удаленно от

объекта наблюдения. Кроме того, местоположение объекта наблюдения может зависеть от времени, что тоже должно найти свое отражение в представлении результата наблюдения.

Для того, чтобы сделать модель наблюдения достаточно общей, в спецификации [130] класс Observation (этот класс представляет наблюдение) не обладает свойством определения местоположения, однако соответствующая информация о местоположении должна предоставляться либо объектом наблюдения, либо процедурой наблюдения в соответствии с конкретным сценарием и быть включена в результат наблюдения. Местоположение должно быть одним из геометрических объектов, определенных в другой спецификации [134].

Для отметки времени в результате наблюдения, как можно видеть на Рисунке 2.1, общая модель предусматривает три возможных варианта:

- время наблюдения;
- время, когда был сгенерирован результат;
- допустимое время, под которым понимается период, в течение которого может быть использован результат измерения.

Таким образом, как можно видеть, результаты наблюдений в соответствии с описываемой моделью могут включать в себя много типов данных, включая не только такие простые типы, такие как категория или измерение, но и более сложные - такие как время или геометрические объекты определенные в спецификации [134].

Модель в рассматриваемой спецификации [130] является абстрактной и допускает различные возможные реализации. В спецификации [129] представлены правила для реализации этой модели в виде XML-схем для наблюдений и для процедур, связанных с выборкой при проведении наблюдений. Реализация получена из концептуальной модели, описанной выше в настоящем параграфе, и следует правилам для схем приложений GML, описанным в OGC Geography Markup Language v3.2 (также опубликованном как ISO 19136: 2007). Таким

образом, результат наблюдения, передаваемый системой сбора пространственно-временных данных, в соответствии с этой спецификацией будет представлять собой некоторый GML-документ.

Итак, выделяя необходимые и существенные для представления данных от сетей геосенсоров детали и опуская несущественные подробности, можно сказать, что данные от датчиков (или сетей датчиков), которые поддерживают набор спецификаций OGC SWE, можно представить как некоторую последовательность кортежей вида (**GID**, **Loc**, **Time**, **A**), где **GID** –идентификатор геосенсора; **Loc** – местоположение (объект который соответствует спецификации OGC [134]); **Time** – некоторое указание на время проведения измерения, которое может быть моментом времени или периодом; **A** – другие данные самого измерения или наблюдения или относящегося к нему контекста, которые не относятся ни ко времени, ни к местоположению.

Кроме уже рассмотренных спецификаций OGC SWE следует рассмотреть спецификацию OGC SensorThings API [132]. Необходимость ее рассмотрения вызывается тем, что существует большое количество устройств-геосенсоров с ограниченными ресурсами, для которых запуск приложений, реализующих спецификации SWE, весьма затруднителен, что демонстрирует работа [156].

Вот для такого рода устройств с ограниченными ресурсами OGC, используя подход REST, и разработал спецификацию SensorThings API [132], которая задает интерфейс для подключения устройств, данных и приложений IoT, использующих ее для представления данных наблюдений и измерений. Основное различие между спецификацией OGC SensorThings API и набором спецификаций OGC SWE заключается в том, что спецификация SensorThings API разработана специально для устройств с ограниченными ресурсами – это ее главное отличие. Она является соответствующей подходу REST (RESTful, как обозначено в самой спецификации) и использует JSON для представления результатов наблюдения.

В 2016 году OGC утвердило эту новую спецификацию. Она состоит из двух частей – части, относящейся к сбору данных, и части, относящейся к

исполнительным устройствам Интернета вещей. Для целей проводимого в настоящем параграфе анализа достаточно рассмотреть только первую часть, поэтому в дальнейшем изложении, говоря о спецификации OGC SensorThings API, автор настоящей работы будет иметь в виду только первую часть этой спецификации.

Сущности, введенные и используемые в этой спецификации, показаны на диаграмме UML, изображенной на Рисунке 2.2. Диаграмма полностью соответствует [132].

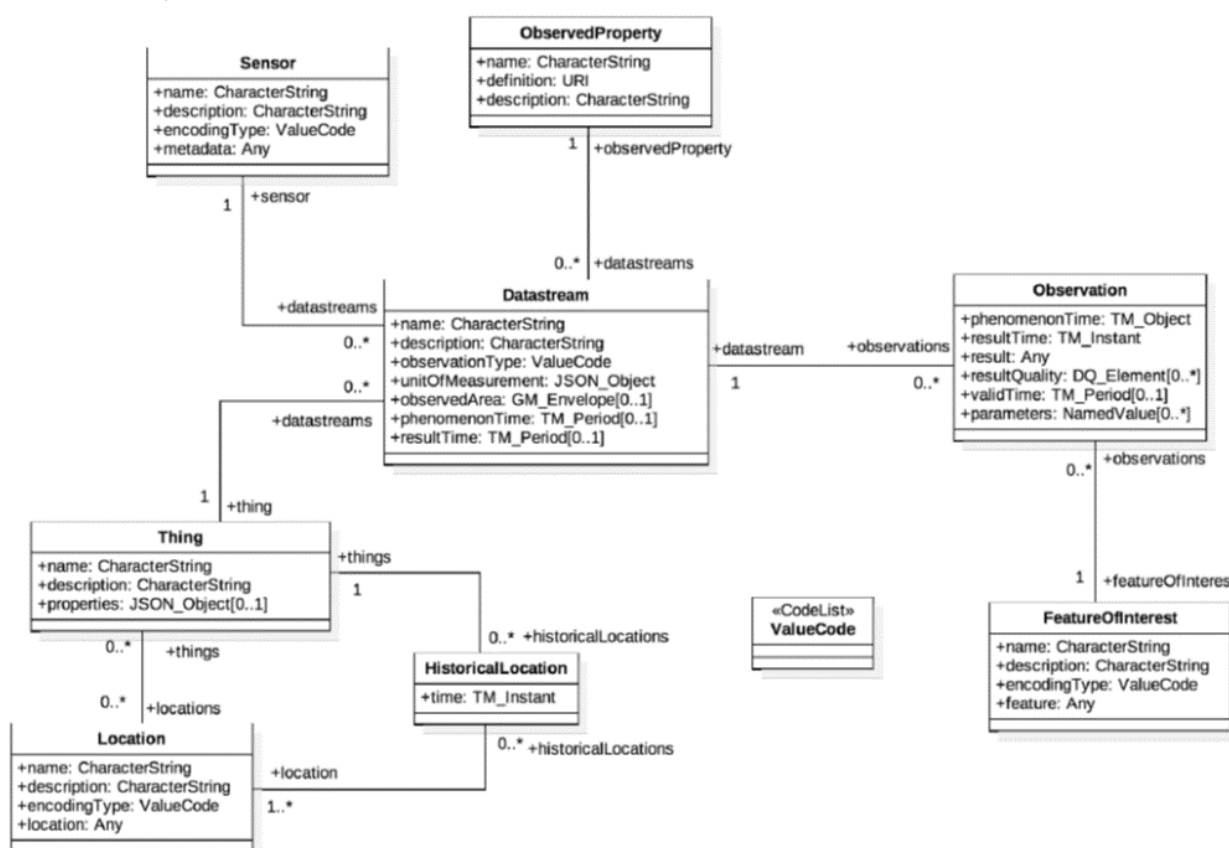


Рисунок 2.2 Сущности спецификации OGC SensorThings API

Сущность Наблюдение (Observation на диаграмме), являясь одной из сущностей представленных на диаграмме, соответствует модели наблюдения OGC SWE, описанной выше. Наблюдение моделируется как действие, которое дает результат, значение которого является оценкой значения свойства объекта

наблюдения (FeatureOfInterest на диаграмме). Местоположение сущности, которая производит наблюдение и передает данные (Thing на диаграмме), представлено как отдельная сущность (Location на диаграмме).

Несмотря на некоторые отличия, не являющиеся существенными с точки зрения цели проводимого анализа, можно сделать вывод, что данные от датчиков (или сетей датчиков), которые поддерживают набор спецификаций OGC SensorThings API, можно также, как и в предыдущем случае представить как некоторую последовательность кортежей вида (**GID**, **Loc**, **Time**, **A**), где **GID** – идентификатор геосенсора; **Loc** – местоположение (объект который соответствует спецификации OGC [134]); **Time** – некоторое указание на время проведения измерения, которое может быть моментом времени или периодом; **A** – другие данные самого измерения или наблюдения или относящегося к нему контекста, которые не относятся ни ко времени, ни к местоположению.

Как уже отмечалось ранее, консорциум OGC и Технический комитет ISO/TC 211 «Географическая информация/Геоматика» представляют собой две основные организации, которые устанавливают правила, обеспечивающие интероперабельность существующих на рынке решений, поэтому вполне логичным представляется ограничиться анализом только тех решений, которые удовлетворяют их спецификациям.

Эти спецификации были описаны выше, и, обобщая их для целей построения математической модели, можно считать, что потоки пространственно-временных данных, поступающие в ГИС из системы сбора пространственно-временных данных, которые используют эти спецификации, представляют собой некоторую последовательность кортежей вида (**GID**, **Loc**, **Time**, **A**), где **GID** – идентификатор геосенсора; **Loc** – местоположение (объект который соответствует спецификации OGC [134] – далее в этой главе эта спецификация будет рассмотрена более подробно); **Time** – некоторое указание на время проведения измерения, которое может быть моментом времени или периодом; **A** – некоторые непространственные данные.

2.2 Математическая модель процессов непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе

2.2.1 Определение целей моделирования

Несмотря на то, что понятия «модель» и «моделирование» являются ключевыми для современной науки, а математические модели применяются практически во всех предметных областях, конкретное толкование этих терминов может несколько различаться в зависимости от контекста употребления.

Так, например, в исследовательской работе [58], относящейся к философии науки, под моделью понимается «такая мысленно представляемая или материально реализованная система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна замещать его так, что её изучение даёт нам новую информацию об этом объекте». В учебниках, предназначенных для студентов вузов, математическая модель обычно определяется как объект - заместитель некоторого объекта-оригинала, обеспечивающий изучение некоторых свойств этого оригинала, Такое определение содержится, например, в учебнике [43]. В монографии [42], в которой сделана попытка в максимальной степени обобщить понятие математического моделирования и сформулировать универсальные методологические подходы к моделированию, математическая модель определяется как «эквивалент» объекта, отражающий в математической форме важнейшие его свойства - законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям. Некоторые работы весьма сужают понятие математической модели, сводя её результатам применения некоторого математического аппарата и включая описание этого аппарата непосредственно в определение. Примером такого неоправданного сужения понятия может быть работа [32], которая определяет математическую модель как систему уравнений, или арифметических соотношений, или геометрических фигур, или комбинацию того и другого, исследование которых средствами математики должно ответить на

поставленные вопросы о свойствах некоторой совокупности свойств объекта реального мира.

Автору настоящей работы представляется наиболее адекватной формулировка, принадлежащая одному из основоположников кибернетики советскому математику Ляпунову А.А. Согласно работе [33] ему принадлежит следующее определение: «Моделирование — это опосредованное практическое или теоретическое исследование объекта, при котором непосредственно изучается не сам интересующий нас объект, а некоторая вспомогательная искусственная или естественная система (модель):

- 1) находящаяся в некотором объективном соответствии с познаваемым объектом;
- 2) способная замещать его в определенных отношениях;
- 3) дающая при ее исследовании, в конечном счете, информацию о самом моделируемом объекте».

Это определение наиболее близко к тому пониманию термина «модель», которое используется в настоящей работе. С точки зрения автора настоящей работы, при разработке математической модели процессов непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС наиболее важным этапом является выбор как подходящего уровня абстракции, так и самих абстракций модели. Поскольку в результате этой работы будет получена, а затем изучена некоторая модель процессов обработки, которая будет передавать только некоторые аспекты этих процессов, то необходимо выделить те аспекты, которые являются важными. Хорошая модель должна описывать эти аспекты и игнорировать все прочие. Важность определяется целью моделирования.

Конечной целью математического моделирования процессов непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС в настоящей работе является повышение эффективности компьютерного моделирования геосистем. Как уже было показано в Главе 1, современное требование к эффективности компьютерного моделирования геосистем предполагает возможность обеспечить

независимость времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков. Как было показано там же, из этого следуют требования расширяемости и масштабируемости процесса непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в этой системе.

Таким образом, модель процессов обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС должна передавать существенные свойства этих процессов, абстрагируясь от несущественных, и тем самым предоставляя базу как для выделения и математической формализации проблем, связанных с расширяемостью и масштабируемостью этих процессов, так и для разработки и проверки решений этих проблем. Нужен тот уровень абстракции, который передает существенные для достижения этой цели свойства процесса и позволяет решить поставленную задачу. В предложенных ранее и описанных в литературе различных моделях обработки данных в геоинформационных системах такая цель не ставилась и, соответственно, не решалась. В следующем пункте настоящей работы приведены результаты проведенного анализа описанных ранее моделей обработки данных в ГИС.

2.2.2 Анализ применимости существующих моделей обработки данных в ГИС

В диссертации 2005 года [13] в качестве одной из продекларированных задач работы было описание моделей процессов обработки, передачи и хранения геопространственных данных. Модель обработки строилась на предположении, что обрабатываемые геопространственные данные представляют собой либо снимки - результаты дистанционного зондирования Земли, либо некоторые картографические материалы, либо данные наземной геодезической и топографической съемки. В качестве входных данных процесса обработки рассматривалась некоторая файловая структура, которая в процессе обработки

подвергалась некоторым преобразованиям. Система обработки в рамках этой модели рассматривалась как группа подсистем, каждая из которых была представлена некоторым оператором. Результат обработки был назван оценкой геопространственных данных и основной задачей системы обработки в этой модели было представление пользователю этих оценок. Эта модель вполне соответствует тому кругу задач, которые рассматривал автор в своей диссертационной работе, например, таких как предобработка спутниковых снимков (атмосферная коррекция, сегментация), но совершенно не соответствует тому кругу задач, которые должны решаться в ГИС, обрабатывающей потоки пространственно-временных данных.

В диссертации 2008 года [48] довольно широкая, первоначально заявленная в работе задача обработки геопространственных данных сужена до задачи построения цифровых моделей местности по исходным геопространственным данным, под которыми в этой работе фактически понимаются только данные наземной съемки, полученные с помощью безотражательных электронных тахеометров. Рассматриваемая модель обработки в силу своего чрезвычайно специализированного характера не может быть применена за пределами поставленной узкой задачи.

В статье 2013 года [9] заявлено о создании математической модели процесса обработки геопространственных данных. Однако несмотря на достаточно глобальное заявление авторов статьи весь описываемый ими процесс обработки геопространственных данных сводится к процессу преобразования снимков, карт, планов, которые представлены в растровом виде, в некоторый векторный формат. В рамках этой модели выделены следующие группы технологических процессов: первичной обработки, геокодирования и трансформирования данных; моделирования, дешифрирования, интерпретации и векторизации данных; разработки и оформления отчетных документов; учета и хранения обработанных данных. Под режимами функционирования ГИС в статье понимается различные способы группировки этих технологических процессов. В рамках описанной в

статье модели с помощью методов теории массового обслуживания получены оценки для времени обработки заявки в системе при различных режимах функционирования. Рассматриваемая модель совершенно не соответствует ГИС, обрабатывающей и анализирующей потоки пространственно-временных данных от сетей геосенсоров.

Статья 2014 года [56] с точки зрения описания модели просто повторяет статью [9], и поэтому все сказанное выше в отношении статьи [9] справедливо и в отношении статьи [56].

Таким образом, можно видеть, что описанные в литературе различные модели обработки данных в геоинформационных системах не соответствуют задачам выделения и математической формализации проблем обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС, связанных с расширяемостью и масштабируемостью этих процессов. В следующем пункте настоящей работы приведено описание математической модели, которая эти задачи решает. Первое описание этой модели приведено в написанной автором настоящей работы статье [28]. Различные соображения автора, предваряющие формальное описание этой модели, содержатся в работах [14, 27, 29].

2.2.3 Ввод и формализация необходимых для построения модели понятий, построение базовой модели

В качестве основы для разработки модели выполнения запросов к потокам пространственно-временных данных в ГИС автором настоящей работы было принято решение использовать некоторые известные конструкции и результаты, полученные при разработке языков запросов к реляционным базам данных. Это связано как с удобством использования уже исследованных математических конструкций, так и с учетом того, что разрабатываемая математическая модель обработки должна предоставить необходимую теоретическую основу для разработки приложений, которые будут реализовывать обработку

пространственно-временных данных как с использованием систем управления потоками данных (СУПД), так и с использованием систем управления базами данных (СУБД).

Математическая модель обработки данных в современных СУБД, используемых в составе ГИС, основана на реляционной алгебре, предложенной Коддом Э. Ф. (Codd E.F.) [77]. В этой модели базовой структурой является отношение, которое является подмножеством декартового произведения некоторых множеств. Более формально (используемая терминология основана на [6]):

Пусть D_1, D_2, \dots, D_n – некоторый конечный набор множеств. Отношением R называют подмножество декартова произведения этих множеств

$$R \subseteq D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n. \quad (2.1)$$

Сами множества D_i называются доменами отношения R . Упорядоченные наборы (d_1, d_2, \dots, d_n) , где $d_1 \in D_1, d_2 \in D_2 \dots d_n \in D_n$ называются кортежами. Схемой отношения R называют упорядоченный набор атрибутов (названий доменов) и записывают как $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$.

Множество всех кортежей $\{(d_1, d_2, \dots, d_n)\}$, соответствующих схеме отношения $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ называют телом отношения R . На множестве отношений введены операции, которые принимают отношения в качестве операндов и возвращают отношение в качестве результата. В первоначальном варианте реляционной алгебры предложенной Коддом этих операций было восемь: шесть бинарных операций (объединение, пересечение, разность, декартово произведение, соединение, деление) и две унарные (проекция и выборка). Как показано Коддом набор этих операций обладает свойством реляционной замкнутости. Следует отметить, что в этой модели отношение обладает следующими свойствами:

1. Тело отношения это множество, поэтому в нем не может быть одинаковых кортежей.
2. Мощность этого множества конечна.
3. Порядок кортежей в отношении не задан.

Как показал проведенный в параграфе 2.1 настоящей работы анализ используемых представлений данных измерений и наблюдений в современных системах сбора пространственно-временных данных элементы потока данных могут представлены кортежами вида (**GID, Loc, Time, A**), где:

- **GID** –идентификатор геосенсора;
- **Loc** – местоположение (объект который соответствует спецификации OGC [134] – далее в этой главе эта спецификация будет рассмотрена более подробно);
- **Time** – некоторое указание на время проведения измерения, которое может быть моментом времени или периодом;
- **A** – некоторые непространственные данные.

Эти кортежи выглядят подобно кортежам в реляционной модели, однако, как показано в работе [30] специфика потоков данных, выводящая их за пределы реляционной модели следующая:

1) Потоки данных представляют собой последовательность кортежей, упорядоченных по времени прибытия или по другим атрибутам, например, таким как, например, время генерации этих данных внешним источником. Эти атрибуты, конечно, будут коррелировать со временем прибытия, но не обязательно будут ему эквивалентны. Эти кортежи поступают для обработки в течение некоторого времени, а не являются доступными изначально.

2) Элементы потока получают от различных внешних источников, а это означает, что система управления, вообще говоря, не имеет возможности управлять порядком прибытия или скоростью передачи элементов потока.

3) Элементы потока поступают в общем случае без каких-либо перерывов и, следовательно, представляют собой неограниченную последовательность, или, по крайней мере, такую последовательность, длина которой неизвестна. Таким образом, система управления не может знать, если или когда поток «закончится».

4) После обработки элемента потока данных он исключается из потока или архивируется. При этом, если требуется оставить возможность дальнейшего

обращения к нему, то его нужно сохранить в памяти, которая, если рассматривать общий случай, имеет намного меньший размер, чем размер потока данных в целом.

Таким образом, при построении модели непрерывной обработки для потока данных следует учесть, что:

1. Кортежей – элементов потока потенциально бесконечно много, а используемая память – конечна.

2. Упорядоченность потока по времени значима, так как именно она совместно с данными о местоположении содержит информацию о изменении пространственных отношений между объектами.

Несоответствие природы потоков данных исходным положениям реляционной модели не позволяет использовать результаты, полученные ранее для различных моделей обработки данных в СУБД, и требует разработки новой модели. Вычислительная среда обработки потока данных настолько сильно отличается от вычислительной среды базы данных, что требуется углубленный анализ и критическая оценка взаимосвязанных проблем, возникающих на уровне модели данных из-за необходимости моделировать порядок в потоках данных и на уровне построения модели запросов.

Отталкиваясь от этой описанной выше специфики потоков пространственно-временных данных и, рассматривая их как счетное упорядоченное множество кортежей, выделим для целей моделирования процессов обработки этих потоков два домена, к которым будут принадлежать элементы кортежей:

- домен времени;
- пространственный домен.

В домене времени выделим:

- время наблюдения - время, когда наблюдение произошло в реальном мире;
- время обработки - время, соответствующее системным часам, при котором данные наблюдения поступают в подсистему обработки ГИС.

Зададим частичный порядок (то есть отношение, которое обладает свойствами рефлексивности, антисимметричности и транзитивности) на некотором непустом

множестве дискретных моментов времени \mathbf{T} . Частично упорядоченное множество \mathbf{T} будем называть временной областью \mathbf{T} . Для обозначения введенного отношения частичного порядка будем далее использовать символ « \leq ».

Определим момент времени τ как любое значение принадлежащее временной области \mathbf{T} , то есть $\tau \in \mathbf{T}$.

Определим период времени как частично упорядоченное множество, задаваемое моментами времени, с которых он начинается τ_{begin} и заканчивается τ_{end} .

$$[\tau_{begin}, \tau_{end}] = \{ \tau \in \mathbf{T} \mid \tau_{begin} \leq \tau \leq \tau_{end} \} \quad (2.2)$$

Из этого определения следует, что для каждого момента времени (кроме того которым этот период времени заканчивается), входящего в заданный период времени, можно определить последующий. Кроме того этого определения следует, что для каждого момента времени (кроме того которым этот период времени начинается), входящего в заданный период времени, можно определить предшествующий.

Определим временной интервал, который может быть открытым, закрытым слева или закрытым справа, следующим образом:

Открытый интервал

$$(\tau_{begin}, \tau_{end}) = \{ \tau \in \mathbf{T} \mid \tau_{begin} < \tau < \tau_{end} \} \quad (2.3)$$

Закрытый слева интервал

$$[\tau_{begin}, \tau_{end}) = \{ \tau \in \mathbf{T} \mid \tau_{begin} \leq \tau < \tau_{end} \} \quad (2.4)$$

Закрытый справа интервал

$$(\tau_{begin}, \tau_{end}] = \{ \tau \in \mathbf{T} \mid \tau_{begin} < \tau \leq \tau_{end} \} \quad (2.5)$$

Таким образом, у нас есть модель домена, которому будут принадлежать значения атрибута, обозначенного в схеме кортежа потока, представляющего данные наблюдений, поступающие в ГИС от системы сбора пространственно-временных данных, как **Time**.

В пространственном домене нам необходимо выделить и формализовать абстракции для моделирования данных о пространственных характеристиках сущностей реального мира, данные о которых рассматриваемая система получает от сетей геосенсоров. Однако эти абстракции нам уже известны из анализа, проведенного в предыдущем параграфе. Это простые геометрические объекты, описанные в спецификации [134]. Более подробно эта спецификация рассмотрена в следующем параграфе при построении системы типов пространственно-временных данных.

Введем следующие базовые определения:

Определение 1: Схемой потока пространственно-временных данных Z будем называть набор атрибутов $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ конечной арности n . По крайней мере один из атрибутов (обозначим его как A_σ) относится к пространственному домену D_σ , а другой атрибут (обозначим его как A_θ) относится к временному домену D_θ , то есть к T .

Определение 2: Потокom пространственно-временных данных $S_{\sigma\theta}$, соответствующим схеме Z , будем называть не более чем счетную последовательность кортежей, соответствующих схеме Z , и упорядоченную по возрастанию значений A_θ .

В случае, если $S_{\sigma\theta}$ содержит конечную последовательность кортежей, то будем называть его конечным потоком, а если нет, то бесконечным потоком.

Обозначим множество всех потоков, соответствующих схеме Z , как $\Lambda(Z)$, а множество всех конечных потоков, соответствующих схеме Z , как $f\Lambda(Z)$. Очевидно, что $f\Lambda(Z) \subseteq \Lambda(Z)$.

Каждый кортеж P из потока пространственно-временных данных $S_{\sigma\theta}$ представляет собой результат произведенного сетью геосенсоров наблюдения, которое произошло в моделируемой геосистеме и с которым связано время τ , определяемое меткой времени τ . Мы предполагаем далее, что эта метка времени не может быть не определена, либо изменена. Будем далее обозначать такой элемент потока $P(\tau)$.

Чтобы сохранить связь со схемой элементов данных, которая была получена в результате анализа, проведенного в предыдущем пункте настоящего параграфа, будем записывать схему кортежа $\mathbf{P}(\tau)$ как:

$$\mathbf{P}(\tau) = ((\mathbf{GID}, \mathbf{Loc}, \tau, \mathbf{A})) \quad (2.6)$$

где \mathbf{Loc} относится к пространственному домену \mathbf{D}_σ , а τ относится к временному домену \mathbf{D}_θ .

Тот факт, что \mathbf{P} является элементом потока $S_{\sigma\theta}$ будем записывать как:

$$\mathbf{P}(\tau) \in S_{\sigma\theta} \quad (2.7)$$

При любой обработке данных к данным применяется некоторый алгоритм обработки, реализующий некоторый запрос (или набор запросов) к поступающим данным, выходом чего является некоторый набор результатов. Поскольку для целей построения модели обработки пространственно-временных данных мы предполагаем, что на вход моделируемой системы обработки подается некоторая упорядоченная последовательность данных, которая превращается в некоторую упорядоченную последовательность результатов, то процесс выполнения запроса \mathbf{Q} к потоку пространственно-временных данных может быть представлен в виде некоторого оператора \mathbf{Q} , отображающего одно множество потоков в другое:

$$\mathbf{Q}: \Delta(\mathbf{Z}_{in}) \rightarrow \Delta(\mathbf{Z}_{out}) \quad (2.8)$$

\mathbf{Z}_{in} – это схема потоков на входе оператора, а \mathbf{Z}_{out} – это схема потоков на выходе оператора.

Будем называть потоки из области определения оператора \mathbf{Q} необработанными потоками, а потоки из области значения оператора \mathbf{Q} производными потоками.

В традиционной модели обработки, используемой в СУБД, данные статичны, а запросы одноразовы. При непрерывной же обработке предполагается, что запрос (или целый набор запросов), неформально говоря, должен выполняться не прерываясь, при этом новые данные появляются также не прерываясь и приводят к появлению новых ответов на этот непрерывно выполняемый запрос. Интуитивное представление о непрерывном выполнении запроса предполагает то, что результат должен постоянно обновляться по мере поступления новых данных.

Главная проблема, которую необходимо решить, чтобы обеспечить такую непрерывность обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС, это проблема блокирующих операторов.

Понятие «блокирующего оператора» используется во многих работах, например, в [127], но большинство из этих работ ссылается в качестве источника термина на работу [121]. В этой работе «блокирующий оператор» неформально определяется так: «Блокирующий оператор запроса - это оператор запроса, который не может создать первый кортеж своего вывода, пока не увидит все кортежи входа».

Связь с непрерывностью обработки потока достаточно очевидна - поскольку входной поток данных потенциально может быть бесконечным, то блокирующий оператор, который имеет на входе этот поток данных, никогда не увидит все кортежи входа, и поэтому никогда не сможет создать первый кортеж своего вывода. К сожалению, многие практически важные пространственные запросы к потокам пространственно-временных данных, такие как, например, определение **k** ближайших соседей, представляют собой в исходном виде блокирующие запросы.

Поскольку разрабатываемая модель процессов обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС должна передавать существенные свойства этих процессов, абстрагируясь от несущественных, и тем самым предоставляя базу как для выделения и математической формализации проблем, связанных с расширяемостью и масштабируемостью этих процессов, а потенциальная неограниченность потока данных и следующая отсюда невозможность использовать блокирующие операторы являются весьма существенным свойством, то необходимо отразить это свойство в модели и исследовать его, используя модель.

Прежде, чем перейти непосредственно к модели и изложению полученных с ее помощью результатов, необходимо сделать несколько предварительных замечаний.

Представляется, что рассмотрение только упорядоченных производных потоков достаточно очевидно в контексте решаемой задачи и не требует дополнительных пояснений.

Также достаточно очевидно, что не любой оператор, отображающий необработанные потоки на производные, имеет смысл рассматривать в контексте обработки потоков. Нам нужно ограничиться рассмотрением только таких операторов, которые можно представить в виде алгоритма, то есть в виде вычислимой функции.

Вообще говоря, под вычислимыми функциями в современной математике понимают функции вида $F: \mathbf{N} \rightarrow \mathbf{N}$, где множество \mathbf{N} счетно и которые могут быть реализованы на машине Тьюринга. Задачу вычисления функции F называют алгоритмически разрешимой или алгоритмически неразрешимой, в зависимости от того, возможно ли написать алгоритм, вычисляющий эту функцию.

Множество всех отображений $Q: \Delta(\mathbf{Z}_{in}) \rightarrow \Delta(\mathbf{Z}_{out})$ при фиксированных схемах \mathbf{Z}_{in} и \mathbf{Z}_{out} несчетно, а множество вычислимых функций среди них не более чем счетно. Таким образом, нужно выделить из множества всех отображений множества потоков на множество потоков класс вычислимых функций.

Реализованная ниже идея моделирования вычислимых операторов, отображающих один бесконечный поток данных на другой, основана на теории вычислимости на бесконечных строках, описанной в работе [159].

Поскольку, согласно Определению 2, поток - это не более чем счетная упорядоченная по возрастанию значения атрибута времени последовательность кортежей, то мы можем представить поток S пространственно-временных данных, как последовательность пронумерованных кортежей $p_1, p_2, \dots, p_n \dots$

Назовем первые k кортежей потока S префиксом длины k потока S и будем обозначать S^k .

Будем обозначать длину префикса $M = S^k$ как:

$$|M| = |S^k| = k. \quad (2.9)$$

Пустую последовательность, не содержащую ни одного кортежа, будем называть нуль-префиксом, обозначать \square , а его длину считать равной 0.

На множестве префиксов потока \mathbf{S} , которое не более чем счетно в силу не более чем счетности элементов потока \mathbf{S} , можно ввести частичный порядок.

Пусть \mathbf{N} и \mathbf{L} - два префикса потока \mathbf{S} .

Тогда, если для некоторого натурального \mathbf{k} , $\mathbf{N} = \mathbf{L}^{\mathbf{k}}$, то будем говорить, что \mathbf{N} является префиксом \mathbf{L} и записывать это как $\mathbf{N} \leq \mathbf{L}$.

Если $\mathbf{k} < \mathbf{n}$, то будем говорить, что \mathbf{S} – точный префикс \mathbf{L} и записывать это как $\mathbf{N} < \mathbf{L}$ (2.10)

В контексте нашей задачи моделирования только вычислимых операторов имеет смысл рассматривать только такие операторы \mathbf{Q} , для которых существует оператор $\mathbf{K}: \mathbf{f}\Delta(\mathbf{Z}_{in}) \rightarrow \mathbf{f}\Delta(\mathbf{Z}_{out})$, отображающий конечные потоки на конечные потоки и такой, что действие оператора \mathbf{Q} на бесконечный поток $\mathbf{S} \in \Delta(\mathbf{Z}_{in})$ можно представить, как последовательное применение этого оператора \mathbf{K} к конечным потокам, которые представляют собой все более и более длинные конечные префиксы бесконечного потока \mathbf{S} .

Иначе говоря, для моделирования нашей задачи обработки потенциально неограниченных потоков, следует сконструировать оператор работающий с бесконечными потоками, но используя оператор, отображающий конечные потоки на конечные потоки.

Вычисляемый оператор \mathbf{Q} , принимающий на вход поток \mathbf{S} , можно представить, как оператор \mathbf{K} , циклически применяемый к последовательности префиксов \mathbf{S} , который для каждого следующего префикса в \mathbf{S} добавляет к производному потоку некоторое конечное число кортежей.

Далее мы будем рассматривать только вычисляемые операторы, не оговаривая это отдельно.

Назовем нуль-оператором оператор, который для любого префикса потока \mathbf{S} , выдает нуль-префикс.

Обозначим $Q^j(N)$ – префикс производного потока, полученный на шаге j , оператором Q , где N префикс потока S длины j .

Очевидно, что $Q^j(N)$, является последовательностью кортежей со схемой Z_{out} , причем и содержание и длина этой последовательности зависят от Q, j и N .

Формализуем понятие неблокирующего оператора.

Пусть оператор Q не является нуль-оператором.

Оператор Q будем называть неблокирующим, если для любого натурального j и для каждого префикса N потока S , длина которого не меньше j , выполняется условие:

$$Q^j(N) = Q(N^j) \quad (2.11)$$

Оператор Q будем называть блокирующим, если для любого натурального j и для каждого префикса N потока S , длина которого больше j , выполняется условие:

$$Q^j(N) = [], \text{ а } Q^{|N|}(N) = Q(N) \quad (2.12)$$

Операторы, не являющимися ни неблокирующими, ни блокирующими, будем называть частично блокирующими.

Поскольку на множестве префиксов потока S ранее уже был задан частичный порядок, то мы можем определить монотонные операторы в отношении это частичного порядка.

Оператор Q монотонен, если для любых префиксов M и N потока S , таких, что $M \leq N$, выполняется

$$Q(M) \leq Q(N) \quad (2.12)$$

До сих пор мы не проводили различия между оператором Q применяемым к бесконечному потоку S (со схемой Z_{in} и производным потоком со схемой Z_{out}) и соответствующим ему отображением

$$FQ: \Delta(Z_{in}) \rightarrow \Delta(Z_{out}) \quad (2.13)$$

Оператор применяемый к бесконечному потоку S в нашей модели соответствует некоторому алгоритму, циклически применяемому к удлиняющимся префиксам необработанного потока S . Конечно, каждому такому оператору однозначно соответствует некоторое отображение

$$\mathbf{FQ}: \Delta (\mathbf{Z}_{in}) \rightarrow \Delta (\mathbf{Z}_{out}) \quad (2.14)$$

Именно поэтому во всех предыдущих рассуждениях не было необходимости проводить это различие. Но вот обратного однозначного соотношения нет – то есть отображению может соответствовать больше чем один оператор.

Тогда возникает практически значимый вопрос: какими свойствами должно обладать отображение, чтобы его можно было бы реализовать неблокирующим оператором?

При исследовании описанной модели такое свойство найдено и его можно формализовать как свойство монотонности для отображения, которое будет формализоваться очень похоже на монотонность для оператора и также будет использовать частичный порядок, заданный на множестве префиксов одного потока.

Отображение $\mathbf{FQ}: \Delta (\mathbf{Z}_{in}) \rightarrow \Delta (\mathbf{Z}_{out})$ будет называться монотонным, если для любого потока S со схемой \mathbf{Z}_{in} выполняется следующее условие: для любых префиксов \mathbf{M} и \mathbf{N} потока S , таких, что $\mathbf{M} \leq \mathbf{N}$, выполняется

$$\mathbf{FQ} (\mathbf{M}) \leq \mathbf{Q} (\mathbf{N}) \quad (2.15)$$

Для введенных математических конструкций можно доказать следующее важное утверждение:

Теорема

Отображение $\mathbf{FQ}: \Delta (\mathbf{Z}_{in}) \rightarrow \Delta (\mathbf{Z}_{out})$ может быть выражено неблокирующим оператором тогда и только тогда, когда оно является монотонным.

Доказательство:

1. Пусть отображение $\mathbf{FQ}: \Delta (\mathbf{Z}_{in}) \rightarrow \Delta (\mathbf{Z}_{out})$ выражено неблокирующим оператором \mathbf{Q} , тогда для любого натурального j и для каждого префикса \mathbf{N} потока S со схемой \mathbf{Z}_{in} , длина которого не меньше j , выполняется условие: $\mathbf{Q}^j (\mathbf{N}) = \mathbf{Q} (\mathbf{N}^j)$. Рассмотрим префиксы \mathbf{M} и \mathbf{N} потока S , причем $|\mathbf{M}|=k$, $|\mathbf{N}|=n$ и $k \leq n$.

Поскольку оператор \mathbf{Q} является неблокирующим, то

$$\mathbf{Q}^k (\mathbf{M}) = \mathbf{Q} (\mathbf{M}^k) \text{ и } \mathbf{Q}^n (\mathbf{N}) = \mathbf{Q} (\mathbf{N}^n)$$

Поскольку $k \leq n$, то $\mathbf{Q}^k (\mathbf{M}) \leq \mathbf{Q}^n (\mathbf{N})$, а следовательно и $\mathbf{Q}^k (\mathbf{M}) \leq \mathbf{Q}^n (\mathbf{N})$.

Таким образом, доказано, что из неблокируемости оператора следует монотонность отображения, которое он реализует.

2. Докажем, что монотонности отображения FQ следует возможность его реализовать неблокирующим оператором. Пусть отображение FQ является монотонным и реализуется некоторым оператором Q . Если Q является неблокирующим, то утверждение доказано, а если нет, то для любого натурального j и для каждого префикса N потока S , длина которого больше j , выполняется условие: $Q^j(N) = []$, а $Q^{j+1}(N) = Q(N)$. Тогда рассмотрим реализующий FQ оператор H применяемый к потоку S , который построен так, что на шаге $j+1$ выдает все кортежи, которые содержатся в $Q^{j+1}(N^{j+1})$, но не в $Q^j(N^j)$. Очевидно, что этот оператор является неблокирующим, так, что утверждение доказано.

Доказанное свойство позволяет свести проблему блокирующих операторов в системе обработки потоков пространственно-временных данных к проблеме реализации пространственно-временных запросов монотонными операторами.

Перейдем от модели пронумерованных кортежей к исходной модели, чтобы сформулировать полученные результаты на ее языке. Мы можем это сделать, поскольку в нашей исходной модели количество кортежей в потоке не более, чем счетно, а во временном домене задан частичный порядок.

Обозначим производный поток, являющийся результатом применения оператора Q ко всем кортежам из необработанного потока S_{τ_0} , имеющим метку времени события меньше τ , как $Q(\tau)$.

Дадим следующее определение:

Оператор Q монотонен, если

$$Q(\tau) \subseteq Q(\tau_i) \text{ для всех } \tau \leq \tau_i \quad (2.16)$$

В соответствии с полученными результатами для монотонных вычислимых отображений потока на поток существуют неблокирующие операторы, реализующие это отображения. Практический вопрос: как их определить и реализовать?

Решение «в лоб» - реализовать монотонный оператор, поскольку он будет неблокирующим, правда пока неясен механизм нахождения общего решения такой задачи. Эмпирически найденный в системах управления потоками данных способ преобразования блокирующих операторов в их неблокирующую форму – это ограничение диапазона входных данных оператора до конечного окна над входными потоками.

Основной замысел состоит в том, чтобы ограничить выполнение запросов только недавно полученными кортежами данных, а не целым потоком. Результатом применения оператора скользящего окна в таких системах является множество кортежей, которые являются в некотором смысле «самыми новыми». Блокирующий оператор применяется не ко всему потоку, а к результату выполнения оконного оператора. Таким образом комбинация оператора скользящего окна и блокирующего оператора трансформирует исходно блокирующий оператор в неблокирующий.

Окно может быть основано либо на временных метках кортежей – оператор окна оставляет в результирующем множестве только кортежи с временной меткой, отстоящей от текущего времени, не более чем на определенный временной промежуток, либо на порядке прибытия кортежей - оператор окна оставляет в результирующем множестве только N последних кортежей. При этом дополнительно задается частота обновления окна. Она тоже может задаваться либо по времени, либо по количеству новых поступивших кортежей.

Идея преобразования блокирующего оператора в неблокирующий с помощью оператора скользящего окна является весьма продуктивной и соответствующей разработанной модели, однако используемая в системах управления потоками данных модель организации скользящего окна не подходит для пространственных запросов к потокам пространственно-временных данных, поскольку пространственные запросы должны определять текущее состояние пространственных отношений между наблюдаемыми объектами, а не пространственные отношения среди объектов, наблюдаемых последними.

Предлагаемая на основании проведенного анализа разработанной математической модели непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных идея – это реализовать оператор скользящего окна на основе сложного пространственного предиката, который может представлять собой реализацию некоторой формулы логики первого порядка с использованием элементарных пространственных предикатов. Сами элементарные пространственные предикаты уже в достаточной мере исследованы в геоинформатике и описаны в спецификации OGC [134]. Такая комбинация оператора скользящего окна на основе пространственного предиката и пространственного запроса, который в своей исходной форме является блокирующим, позволяет добиться требуемой непрерывности обработки.

Тогда процесс непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС с использованием введенных ранее обозначений можно представить, как:

$$\mathbf{Z}_{out} = \mathbf{Q}(\mathbf{P}(\mathbf{Z}_{in})) \quad (2.17)$$

где \mathbf{P} – оператор скользящего окна на основе сложного пространственного предиката, а \mathbf{Q} – пространственно-временной оператор циклически применяемый к множеству кортежей, являющемуся результатом применения оператора скользящего окна.

Методы и методические подходы, необходимые для реализации такой модели обработки, подробно разбираются в Главе 3 настоящей работы.

2.3 Система типов пространственно-временных данных

С самого начала разработки программного обеспечения ГИС в исследовательском сообществе осознавалась необходимость разработки специальных типов данных для моделирования пространственных свойств объектов и надлежащего представления этих моделей в вычислительной среде, в которой должно будет функционировать это программное обеспечение. Вначале основные усилия были сосредоточены на моделировании геометрии и надлежащем представлении соответствующих данных в ГИС. Были разработаны теоретические основы для таких типов данных как точка, линия и область, и для таких более сложные типов как сети. Для организации обмена пространственными данными между различными ГИС начали разрабатываться стандарты на сами эти типы и на представления этих типов. Ведущими организациями в этой области являются Технический комитет ISO/TC211 «Географическая информация/Геоматика» и организация OGC (Open Geospatial Consortium). ISO представляет собою ассоциацию, членами которой являются около 130 национальных органов стандартизации различных государств. OGC является международным консорциумом, в который входят более 400 компаний, правительственных агентств и университетов, участвующих в процессе согласования проектов разработки стандартов и требований к обработке геоинформационных данных.

Основной спецификацией, определяющей на концептуальном уровне модели геометрических свойств пространственных объектов и которая используется в качестве основы во всех спецификациях OGC и ISO/TC211 является спецификация [134]. На Рисунке 2.3 приведена диаграмма UML, отображающая иерархию классов, представляющих эту модель. Диаграмма, полностью соответствует [134].

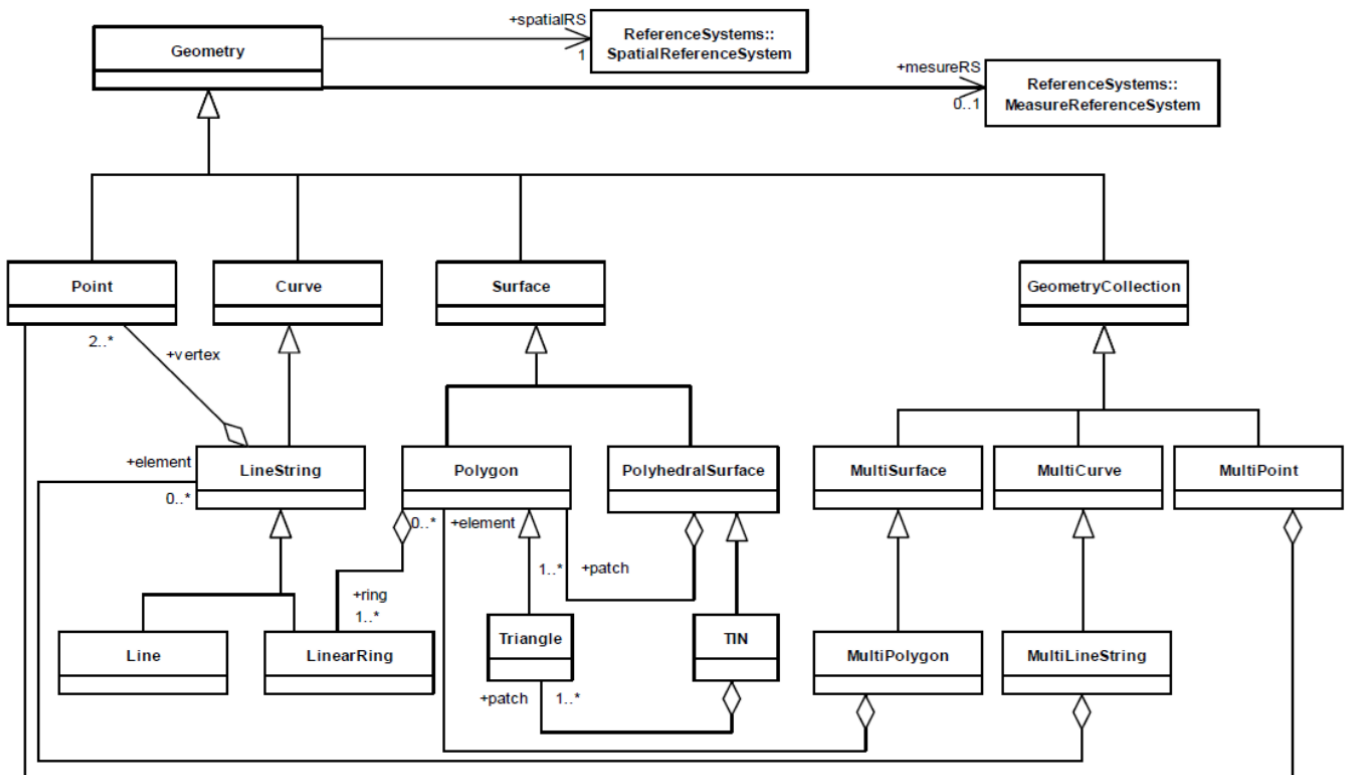


Рисунок 2.3 Иерархия классов, представляющих простые геометрические объекты

Имеются различные спецификации, которые реализуют эту модель. С точки зрения анализа модели имеет смысл рассмотреть какую-либо спецификацию, которая ее реализует. Как возможный объект такого анализа хорошо подходит спецификация WKT (Well-Known Text), которая является продуктом совместной деятельности OGC и ISO/TC211. Это спецификация интересна тем, что она:

- полностью соответствует концептуальной модели простых объектов (Simple Features в тексте спецификации) [134];
- имеется полный аналог этой спецификации для реализации в виде файла массива двоичных данных BLOB (Binary Large Object) – это спецификация WKB (Well-known binary);

- спецификация WKT поддерживается практически любым программным обеспечением современных ГИС и поэтому часто используется при передаче данных.

Эта спецификация может использоваться для представления геометрических объектов (иногда называемых в русскоязычной литературе по геоинформатике просто геометриями), систем координат и преобразований между системами координат. Последние изменения в спецификации были сделаны в 2016 году и с ее текущей версией можно ознакомиться в стандартах [103, 104].

Геометрические объекты в WKT могут быть представлены в двухмерном, трехмерном и четырехмерном пространстве. Геометрические объекты в двухмерном пространстве состоят из точек с двумя координатами. В синтаксисе WKT такой, например, геометрический объект как точка с двумя координатами записывается как POINT (55.39 37.64). Геометрические объекты в трехмерном пространстве состоят из точек с координатами x, y и z или x, y и m, где m – это измерение. Например, точка POINT (55.39 37.64 27) может использоваться для представления температуры, измеренной в градусах Цельсия; где 55,39 – это географическая широта этой точки, 37,64 – это ее долгота, и 27 - это температура измеренная в этой точке. Геометрические объекты в четырехмерном пространстве имеют точки с координатами x, y, z и m с семантикой, аналогичной предыдущему примеру.

Геометрические объекты, представленные с использованием спецификации WKT, обладают следующими свойствами:

- все точки, составляющие границу геометрического объекта, считаются принадлежащими ему;
- все координаты в пределах геометрического объекта находятся в одной и той же системе координат;
- пространственные операции для трехмерных и четырехмерных геометрических объектов работают в «геометрии карты», то есть выполняются над их проекциями на двумерное пространство.

Последнее свойство означает, что значения z и m не учитываются в ни в числовых результатах применения операции (например, когда вызываются функции, требующие проведения расчетов в пространстве), ни тогда, когда результатом операции является новый геометрический объект (например, при вызове функций `buffer` или `minimum bounding box`). Таким образом, спецификация WKT по своей сути относится к двумерной геометрии.

Как уже говорилось спецификация WKT полностью соответствует концептуальной модели представленной на Рисунке 2.3.

Наиболее общий класс `Geometry` имеет подклассы `Point`, `Curve`, `Surface` и `Geometry Collection`. Коллекция `Geometry` дополнительно определяет классы для ноль-мерных, одномерных и двумерных геометрических объектов, называемых `MultiPoint`, `MultiLineString` и `MultiPolygon` соответственно. Каждый геометрический объект связан с либо с некоторой системой, в рамках которой будет интерпретироваться дополнительная координата (третье или четвертое измерение геометрического объекта) - это может быть либо некоторая система координат, либо некоторая система интерпретации измерений. Например, точка наибольшей влажности может быть смоделирована как точка с координатами x , y и m , где координаты x и y используются для представления местоположения этой точки, а координата m представляет измеренный уровень влажности.

Ниже приведена дополнительная информация для каждого реализованного класса, изображенного на Рисунке 2.3:

- **Point** (Точка). Точка представляет собой одно место в координатном пространстве. Точка имеет координаты x и y и может иметь z и m в зависимости от того, какая система интерпретации будет указана, как уже было указано выше.

- **Curve** (Кривая). Кривая представляет собой одномерный геометрический объект. Подтипы этого класса определяют тип интерполяции, который используется между точками.

- **LineString** (Ломаная). - это подтип класса `Curve`, который использует линейную интерполяцию между точками. Ломаная может быть замкнутой, если ее

начальная точка равна ее конечной точке. Ломаная является простой, если она не имеет самопересечений.

- **Line** (Линия). Линия - это ломаная с двумя точками.

- **LinearRing** (в русскоязычной литературе по геоинформатике не сложилось общепотребительного термина, соответствующего названию этого класса). **LinearRing** является ломаной, которая является одновременно замкнутой и простой.

- **Surface** (Поверхность). Поверхность представляет собой двумерный геометрический объект. Этот класс является абстрактным (т. е. он не может иметь экземпляров). Простая фрагмент поверхности («patch») может иметь одну внешнюю границу и 0 или более «внутренних» границ (то есть, например, представлять собой многоугольник с отверстиями).

- **Polygon** (Полигон). Полигон - это простая поверхность, которая является плоской. Он имеет ровно одну внешнюю границу и может иметь несколько непересекающихся внутренних границ. Каждый полигон является топологически замкнутым, а две границы (внутренние или внешние) могут только касаться в точке, но не пересекаться.

- **Triangle** (Треугольник). Треугольник представляет собой полигон с тремя различными неколлинеарными вершинами и без внутренней границы.

- **Polyhedral Surface** (Многогранная поверхность). Многогранная поверхность представляет собой набор полигонов с общими граничными сегментами. Каждая пара полигонов, которые соприкасаются, имеет общую границу, которая может быть представлена как конечный набор ломаных. Каждая такая ломаная является частью границы не более 2 полигонов.

- **TIN** (Нерегулярная сеть триангуляции). Нерегулярная сеть триангуляции представляет собой многогранную поверхность, состоящую только из треугольных простых сегментов поверхностей.

- **Geometry Collection** (Коллекция геометрических объектов). Коллекция геометрических объектов представляет собой набор различных геометрических объектов.

- **MultiPoint**. Экземпляр класса представляет собой набор геометрических объектов, элементами которой являются точки, которые не связаны.

- **MultiCurve**. Экземпляр класса представляет собой набор геометрических объектов, элементами которого являются кривые.

- **MultiLineString**. Экземпляр класса представляет собой набор геометрических объектов, элементами которого являются ломаные.

- **MultiSurface**. Экземпляр класса представляет собой набор двумерных геометрических объектов, элементы которого являются поверхностями.

- **MultiPolygon**. Экземпляр класса представляет собой набор двумерных геометрических объектов, элементами которого являются полигоны.

Интерпретация координат геометрического объекта зависит от системы координат, связанной с этим объектом. В соответствии со спецификацией WKT система координат, связанная с геометрическим объектом, никогда не внедряется в представление этого объекта, а указывается отдельно с использованием соответствующих средств, предписанных спецификацией.

Описанная спецификация основана на объектной модели пространства, однако в некоторых случаях полученные данные о реальном мире наиболее естественным образом отображаются в модели на основе полей. Особенно это касается данных, полученных от сетей геосенсоров. Набор предусмотренных операций с введенными простыми объектами тоже достаточно ограничен. Поэтому в геоинформатике для моделирования аспектов реального мира, более сложных чем только геометрические, начали разрабатываться типы данных, которые должны были помочь адекватно снизить эту сложность. При этом исследовательским сообществом в области геоинформатики было замечено, что парадигма обобщенного программирования очень хорошо подходит для разработки геоинформационных систем. Детальному обоснованию этого

положения, например, была посвящена работа [87]. Это связано с тем, что многие алгоритмы для обработки пространственных или пространственно-временных данных могут быть разработаны и сформулированы не в терминах конкретных компьютерных представлений моделей пространственных или пространственно-временных данных, а в терминах требований к синтаксическим и семантическим свойствам таких моделей данных, то есть в виде алгоритмов, применяемых к соответствующим абстрактным типам пространственных или пространственно-временных данных.

Как было отмечено в работе [16] «использование парадигмы обобщенного программирования при построении программной платформы для обработки и хранения пространственных данных позволяет оптимизировать трудозатраты на разработку типовых программных блоков, увеличить выразительность исходного кода, наделить потребителя функций программной платформы (прикладного программиста) возможностями для точного контроля низкоуровневых аспектов работы системы».

В качестве краткого описания парадигмы обобщенного программирования можно использовать определение из работы [37]: «Обобщенным программированием называется подход к программированию, в котором упор делается на проектирование таких алгоритмов и структур данных, которые работали бы в наиболее общей ситуации без потери эффективности». Даже из этого краткого определения видно, что эта парадигма программирования тесно связана с понятием абстрактного типа данных, который определяется набором требований, описывающий интерфейс и семантическое поведение этого типа данных.

Понятие абстрактного типа данных в явном виде впервые было сформулировано в работе [114] и является основой парадигмы обобщенного программирования. Вместо описания отдельного типа в обобщённом программировании применяется описание семейства типов, имеющих общий интерфейс и общее семантическое поведение.

Особенно хорошо парадигма обобщенного программирования при проектировании геоинформационных систем сочетается с компонентным подходом к проектированию геоинформационных систем. Модель произвольного компонента геоинформационной системы, в общем случае имеет вид кортежа

Comp = (**CName**, **CInt**, **CCont**, **CImp**, **CServ**), где:

CName представляет собой уникальное имя компонента;

Множество **CInt** = {**CInt_i** | **i** ∈ **I**} представляет собой множество интерфейсов, связанных с этим компонентом, а **I** – это индексное множество множества **CInt**;

Интерфейс управления экземплярами компонента обозначен как **CCont**;

Множество **CImp** = {**CImp_j** | **j** ∈ **J**} с индексным множеством **J** представляет собой множество реализаций компонента, где **J** – множества **CImp**;

Интерфейс **CServ** = {**CServ_r** | **r** ∈ **R**}, с индексным множеством **R** определяет множество системных сервисов, необходимых для поддержки функционирования компонента и его взаимодействия с компонентной средой.

Разработка подходящих абстрактных типов пространственных или пространственно-временных данных – это неотъемлемая часть разработки математического, лингвистического и программного обеспечения геоинформационных систем при использовании парадигмы обобщенного программирования. Компоненты программного обеспечения геоинформационной системы, разработанной с использованием абстрактных типов данных, проще повторно использовать и модифицировать, чем программные компоненты, в которой структуры данных, алгоритмы и интерфейсы отягощены избыточными предположениями о конкретном компьютерном представлении пространственных или пространственно-временных данных. Таким образом, разработка программной компоненты с использованием абстрактных типов данных оказывается одновременно проще и эффективнее.

Для описания полных и непротиворечивых спецификаций абстрактных типов данных может быть использован такой раздел универсальной алгебры, как теория

алгебраических систем. Под алгебраической системой в универсальной алгебре понимается некоторое непустое множество U с заданным на нём набором (возможно, бесконечным) конечно-арных операций над ним и конечно-арных отношений, удовлетворяющим некоторой системе аксиом. Операции реализуются как функции от одного или более параметров, действующие на элементах множества (для 1-арных операций) или на декартовых произведениях подмножеств этого множества (для операций с арность больше 1). Более формально:

Алгебраическая система — это упорядоченная тройка $A = (U, \Omega, \Pi)$, где:

U — это некоторое множество, называемое носителем алгебраической системы;

Ω — это некоторое множество операций на множестве U ;

Π — это некоторое множество отношений на U .

Алгебраическую систему называют конечной, если ее носитель — конечное множество.

Алгебраическая система с пустым множеством ($\Pi = \emptyset$) отношений называется Ω -алгеброй, а алгебраическую систему с пустым множеством операций ($\Omega = \emptyset$) называют моделью или реляционной системой [26].

Такая алгебраическая структура действительно похожа на систему абстрактных типов данных, поэтому достаточно логичным представляется использовать эту конструкцию для строго описания системы типов.

Поскольку в случае построения системы абстрактных типов пространственно-временных данных придется иметь дело с комплексным описанием разнородных сущностей, то нужно выбрать среди разнообразного математического инструментария теории алгебраических систем наиболее подходящий инструмент.

Как представляется автору настоящей работы таким инструментом являются многосортные алгебраические системы, основное множество которых U (суперуниверсум) разбито на универсумы сортов, причем для элементов каждого сорта определен свой набор функций. Более формально, но кратко, это можно описать в виде следующей конструкции:

Сигнатурой многосортной алгебры Ω называется пара (S, F) , где S - это множество имен сортов, F - это множество имен операций.

Многосортной Ω -алгеброй над сигнатурой $\Omega = (S, F)$ называется пара (A, I) , где A - множество объектов алгебры, а I - интерпретация сигнатуры Ω на A . Для каждого имени сорта $s \in S$ интерпретацией определяется множество $A_s \in A$, называемое множеством-носителем этого сорта s . Каждому объекту алгебры интерпретацией должен быть приписан по крайней мере один сорт.

Для каждого имени операции $f_i \in F$ определяется отображение

$$f_i : A_1 \times \dots \times A_n \rightarrow A_{n+1}$$

где каждый A_i — носитель сорта s_i .

Функции могут быть частичными, то есть не всюду определёнными на декартовом произведении $A_1 \times \dots \times A_n$. В этом случае алгебра называется частичной.

Если же все функции тотальны (то есть, всюду определены на декартовом произведении $A_1 \times \dots \times A_n$), то алгебра называется тотальной.

Такой подход к разработке типов пространственно-временных данных, на основе многосортных алгебраических систем, был уже использован в работе [93]. Как представляется автору настоящей работы, эта работа является базовой для последующих исследований в этой области и поэтому должна быть рассмотрена более подробно.

В этой работе был определен набор абстрактных типов пространственно-временных данных для описания движущихся объектов и показано, что этот набор может служить основой для представления и выполнения запросов к описанным таким образом пространственно-временным данным. Следует заметить, что в работе было учтено, что при разработке абстрактных типов данных определение структуры данных для этого типа и определение семантики операций с этим типом могут быть сделаны на различных уровнях абстракции и введены термины для этих двух уровней - абстрактная модель и дискретная модель (the abstract model и the discrete model – в оригинале работы).

Например, траектория движущейся точки может быть описана либо как гладкая кривая, либо как ломаная. В первом случае траектория описывается бесконечным множеством точек (без фиксации требования какого-либо конечно-точечного представления этой кривой), а во втором случае описание использует представление траектории в виде конечного множества точек (концы отрезков, образующих ломаную). Преимущество уровня абстрактной модели состоит в концептуальной ясности и простоте, поскольку на этом уровне не нужно выражать семантику в терминах конечного представления. К тому же, разработав абстрактную модель, мы свободны в выборе возможных конечных представлений этой модели. Поскольку в этой работе наиболее адекватными абстракциями объектов реального мира считается точка и полигон, то в качестве основных абстрактных типов данных вводится тип «движущаяся точка» и «движущийся полигон». В соответствии с введённым в этой работе делением на два уровня абстракции (абстрактная модель и дискретная модель) типы пространственно-временных данных конструируются в два этапа.

Сначала в виде многосортной алгебры строится абстрактная модель типов и операций над ними в непрерывном пространстве. Операторы, вместе с типами их аргументов и результатов, представляют собой сигнатуру этой многосортной алгебры. Семантика сигнатуры определяется путем связывания с каждым сортом соответствующего набора типов данных, а с каждой операцией - соответствующего оператора.

На втором этапе, типы данных и операции определяются на дискретной модели, пригодной для непосредственной компьютерной реализации. В этой работе предполагается, что данные об объектах, которые непрерывно, с течением времени, меняют свое местоположение, хранятся в реляционной базе данных. Результаты работы были использованы для реализации системы управления базой данных HERMES [136].

Со времени выхода в свет описанной работы существенно возросли новые технологические возможности по сбору пространственно-временных данных и

возникла необходимость определить типы данных не только для движущихся объектов, но и для более сложных объектов. Кроме того при разработке новой системы типов пространственно-временных данных следует учесть возможность их применения не только в СУБД, но и в СУПД.

Подробный анализ современной ситуации и обоснование необходимости разработки новых моделей пространственно-временных данных содержится в Главе 1 настоящей работы. К изложенным там общим соображениям о необходимости разработки типов пространственно-временных данных для условий распределенных вычислений следует добавить еще то, что необходимость разработки новой системы типов вызвана еще и тем, что существующие современные геоинформационные модели пространственных данных могут обеспечить концептуальный уровень для представления только отдельного потока пространственно-временных данных.

Например, такой тип пространственных данных, представленный в модели [134], как точки, действительно может быть использован для создания модели потока кортежей с атрибутами расположения датчика [61]. Такое представление позволяет моделировать отдельные потоки пространственно-временных данных, оставляя, однако, решение задач, связанных с интеграцией потенциально очень больших наборов одновременных потоков пространственно-временных данных в абстракции более высокого уровня, такие как, например, поля, в зоне ответственности индивидуального кода приложения. Такая ситуация значительно затрудняет как разработку, так и верификацию правильности поведения программного обеспечения ГИС для решения задач динамического моделирования полевых структур, как результата обработки потоков пространственно-временных данных. Отсутствие такой высокоуровневой модели - это серьезное препятствие в анализе больших, сложных и разнообразных потоков пространственно-временных данных.

Конечно, современные технологии разработки программного обеспечения располагают широким репертуаром формальных методов, которые позволяют

убедиться, что система ведет себя в соответствии с некоторой спецификацией ее поведения, явной или неявной. Однако, как отмечено в [36] самый популярный и испытанный формальный метод контроля поведения программы - это системы типов. Именно этим определяется актуальность и практическая ценность предлагаемого далее решения.

При разработке такой системы типов следует принимать во внимание, что современные системы обработки и анализа как больших данных, так и потоков данных высокой интенсивности, реализуются в виде распределенных вычислительных кластеров. Такое решение дает возможность легкого горизонтального масштабирования системы, но требует, в свою очередь, использования такой модели программирования, которая позволяла бы относительно легко распределять вычислительные задачи внутри больших компьютерных кластеров. Таким образом, важным требованием к системе типов данных, предназначенных для использования в системах управления потоками данных, является требование возможности организации репликации данных и возможности организации параллельной обработки данных.

Для реализации задач анализа результатов выполнения пространственных запросов к потокам пространственно-временных данным разработчики должны располагать гибкими средствами структуризации как исходных данных, так и результатов их обработки. Исходные данные представляют собой просто последовательность кортежей, соответствующих схеме, которая была определена в этом параграфе ранее. Результатом же применения средств структуризации, должны быть сложные объекты, которые можно использовать для проведения высокоуровневого анализа моделируемых геосистем.

В соответствии с требованиями к репликации данных и возможности организации параллельной обработки данных, для любого такого сложного объекта должна обеспечиваться возможность его репликации как единого целого. Каждый такой сложный объект должен рассматриваться как единое целое как на уровне языка обработки, так и на уровне системы управления потоками данных.

Чтобы обеспечить выполнение этих требований и разработать представленную ниже систему типов, которая позволила бы с одной стороны, гибко структурировать исходные данные для выполнения пространственных запросов, а с другой стороны надежно контролировать выполнение заданных спецификаций, в соответствие с соображениями изложенными ранее, был использован математический аппарат теории алгебраических систем. Этот аппарат подробно описан в уже ставшей классической работе [26].

Идея применения алгебраического подхода к разработке типов пространственно-временных данных была изложена автором настоящей работы первоначально в статье [27], а описание самой разработанной системы типов в [31].

Хотя выше уже был кратко упомянут такой математический инструмент как сигнатура алгебраической системы, который позволяет перейти на более высокий уровень абстракции по сравнению с конкретной алгебраической системой и использовать вместо множеств, операций и отношений их имена, а также описывать соотношения между операциями через имена. Система, разработанная в виде сигнатуры, может быть реализована как конкретная алгебраическая система выбором множеств-носителей.

Ниже описан результат применения этого математического аппарата для разработки предлагаемой системы типов в виде расширенной сигнатуры многосортной алгебраической системы.

Сначала уточним и конкретизируем используемые понятия, которые уже были упомянуты выше.

Сигнатурой Ω многосортной алгебраической системы называется пара (Ξ, Σ) , где

1. Ξ – это множество имен множеств, которые называются сортами.
2. Σ – это множество имен операций, такое, что для каждого имени операции указывается набор имен сортов – аргументов этой операции и имя сорта – результата выполнения операции.

Терм сорта Ξ над сигнатурой $\Omega = (\Xi, \Sigma)$ определяется следующим индуктивным образом:

1. Константа $\omega: \rightarrow \Xi$ это терм сорта Ξ .
2. Если τ_1, \dots, τ_n - это термы сортов Ξ_1, \dots, Ξ_n , соответственно, и ω – имя n-арной операции $\omega: \Xi_1 \times \dots \times \Xi_n \rightarrow \Xi$, тогда $\omega(\tau_1, \dots, \tau_n)$ – это терм сорта Ξ .

В контексте задачи построения системы типов, сорта сигнатуры - это коллекции типов, а операции этой сигнатуры - это конструкторы типов, которые позволяют создавать те самые сложные объекты, о которых говорилось ранее в настоящей статье. Термы над этой сигнатурой – это, собственно, все возможные типы предлагаемой системы типов. Использование расширенной сигнатуры дает следующие преимущества:

1. Операции – конструкторы типов могут быть применены не только к типам из коллекции типов, но и ко всем возможным (в исходной сигнатуре) типам.
2. Возможно определить операции, которые применяются к переменному числу операндов.
3. В число сортов включаются и декартовы произведения сортов.

Далее кратко описывается предложенная система типов.

Множество сортов $\Xi = \{\text{БАЗОВЫЕ ТИПЫ, ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ТИПЫ, ВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ, ГЕОПОЛЕ, ЛИНИЯ ВРЕМЕНИ, ДИНАМИЧЕСКОЕ ГЕОПОЛЕ, СЛОЖНОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ГЕОПОЛЕ}\}$. Каждый сорт – это коллекция типов данных определенного вида. Неформальное описание семантики каждой коллекции типов приведено далее. Для формального задания семантики нужно задать множества-носители сортов, что имеет смысл делать уже при реализации предложенной системы типов в рамках разработки лингвистического и программного обеспечения геоинформационной системы для конкретной предметной области.

Операции в этой сигнатуре будут конструкторами типов. Для наглядности операции в предлагаемой сигнатуре сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 Множество Σ : операции (конструкторы типов)

Сорта аргументов	Сорт результата	Название операции (конструктора типов)
	БАЗОВЫЕ ТИПЫ	Int float string bool
	ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ТИПЫ	Point Curve LineString Line LinearRing Surface Polygon Triangle Polyhedral Surface TIN Geometry Collection MultiPoint MultiCurve MultiLineString MultiSurface MultiPolygon
	ВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ	Instant
(БАЗОВЫЕ ТИПЫ)+	ГЕОПОЛЕ	simpleGF simpleGFVector
(БАЗОВЫЕ ТИПЫ)+	ЛИНИЯ ВРЕМЕНИ	simpleTF simpleTFVector

Продолжение Таблицы 1

Сорта аргументов	Сорт результата	Название операции (конструктора типов)
(БАЗОВЫЕ ТИПЫ)+	ДИНАМИЧЕСКОЕ ГЕОПОЛЕ	simpleDGF simpleDGFVector
(БАЗОВЫЕ ТИПЫ ∪ ПРОСТРАНСТВЕНН ЫЕ ТИПЫ ∪ ВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ ∪ ГЕОПОЛЕ ∪ ЛИНИЯ ВРЕМЕНИ ∪ ДИНАМИЧЕСКОЕ ГЕОПОЛЕ)+	СЛОЖНОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ГЕОПОЛЕ	complexGF complexTF complexDGF complexGFVector complexTFVector complexDGFVector

Типы из коллекции типов БАЗОВЫЕ ТИПЫ создаются конструкторами `int`, `float`, `string`, `bool`. Название конструкторов узнаваемы для любого занимающегося программированием и достаточно точно передают семантику создаваемого соответствующим конструктором типа. Эта коллекция типов предназначена для представления результатов наблюдений, поступающих от источников потоков пространственно-временных данных, и включает в себя целочисленный тип данных, тип данных с плавающей точкой, тип данных «строка символов», а также логический тип данных. Как показывают результаты анализа представлений данных измерений и наблюдений в современных системах сбора пространственно-временных данных, описанные в параграфе 2.1 настоящей работы, этих типов достаточно для представления результатов наблюдений.

Типы из коллекции типов ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ТИПЫ создаются конструкторами `Point`, `Curve`, `LineString`, `Line`, `LinearRing`, `Surface`, `Polygon`, `Triangle`, `Polyhedral Surface`, `TIN`, `Geometry Collection`, `MultiPoint`, `MultiCurve`, `MultiLineString`, `MultiSurface` и предназначены для представления местоположения

в результатах наблюдения. Названия конструкторов совпадают с названиями классов в спецификации WKT [103, 104] и имеют ту же самую семантику. Это делает эту коллекцию типов полностью соответствующей спецификации OGC [134] и, в соответствии с результатами анализа представлений данных измерений и наблюдений в современных системах сбора пространственно-временных данных, описанные в параграфе 2.1 настоящей работы, этих типов достаточно для представления местоположения в результатах наблюдений.

Для коллекции типов ВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ предусмотрен один конструктор `Instant`. Создаваемые им типы предназначены для представления времени в результатах наблюдения и соответствуют требованиям описанной в пункте 2.2.3 настоящей работы математической модели процессов непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе.

Для создания типов из коллекции типов ГЕОПОЛЕ предусмотрены два конструктора `simpleGF` и `simpleGFVector`. Оба конструктора представляют собой применение операций расширенной сигнатуры к коллекции БАЗОВЫЕ ТИПЫ. Типы создаваемые конструктором `simpleGF` предназначены для представления отображений точек пространства в значения некоторого атрибута, а типы создаваемые конструктором `simpleGFVector` предназначены для представления отображений точек пространства в значения некоторого набора атрибутов. Типы данных, создаваемый конструктором `simpleGF`, даст возможность представить некоторое стационарное геополе, например, зафиксированное в некоторый момент времени пространственное распределение уровня загрязнения. Конструктор `simpleGFVector` позволяет создать тип данных для представления отображений точек пространства в вектор значений потенциально разных типов. Таким вектором может быть например вектор, состоящий из значения спектральной яркости, высоты над уровнем моря и значения влажности.

Для создания типов из коллекции типов ЛИНИЯ ВРЕМЕНИ также предусмотрены два конструктора `simpleTF` и `simpleTFVector`. Оба конструктора представляют собой применение операций расширенной сигнатуры к коллекции

БАЗОВЫЕ ТИПЫ. Типы создаваемые конструктором `simpleTF` предназначены для представления отображений точек на временной оси в значения некоторого атрибута (то есть, например, временных рядов значений некоторой величины), а типы создаваемые конструктором `simpleTFVecto` предназначены для представления отображений точек на временной оси в значения некоторого набора атрибутов (то есть временных рядов значений некоторой величины, которая представляет собой, например, некоторый вектор или тензор).

Типы из коллекции типов **СЛОЖНОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ГЕОПОЛЕ** предназначены для добавления гибкости представления пространственно-временных данных и дополнительных возможностей построения запросов к этим данным. Конструкторы предназначенные для создания типов из этой коллекции: `complexGF`, `complexTF`, `complexDGF`, `complexGFVector`, `complexTFVector`. Тип, относящийся к этой коллекции типов, может быть комбинацией любых значений типов, определенных в предлагаемой модели до этого. Можно, например, построить такой тип данных как временная последовательность мгновенных снимков геополя или геополе, в котором каждой точке пространства соответствует некоторый пространственный объект.

Определение и реализация соответствующих предметной области типов данных, вероятно, является основной задачей при разработке ГИС, а описанная выше система типов данных обеспечивают фундаментальную абстракцию для моделирования изменения объектов в геопространстве, их отношений и свойств, данные о которых поступают в виде потоков пространственно-временных данных. Их применение обеспечивает надежную верификацию корректного поведения программного обеспечения ГИС, что косвенным образом в значительной степени отвечает за производительность ГИС, и оказывает большое влияние на выразительную способность пространственных запросов.

2.4 Краткие выводы по Главе 2

Предложенная математическая модель предоставляет тот уровень абстракции, который необходим для разработки методов обработки интенсивных потоков пространственно-временных данных для компьютерного моделирования геосистем в режиме реального времени. Она может служить основой для разработки и внедрения приложений, ориентированных на обработку потоков пространственно-временных данных высокой интенсивности, поскольку позволяет свести проблему обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах в режиме реального времени к проблеме реализации пространственно-временных запросов монотонными операторами. В рамках описанной модели предложен способ реализации произвольного блокирующего пространственно-временного запроса в виде монотонного оператора, который представляет собой композицию оператора скользящего окна на основе сложного пространственного предиката и блокирующего пространственно-временного запроса, циклически применяемого к множеству кортежей, являющемуся результатом применения оператора скользящего окна.

В отличие от ранее предложенных моделей обработки данных в ГИС:

- учитывает специфику потоков пространственно-временных данных;
- позволяет реализовать непрерывную обработку потоков пространственно-временных данных, тем самым обеспечивая расширяемость и масштабируемость процессов обработки.

Разработанная система типов пространственно-временных данных в виде расширенной сигнатуры многосортной алгебраической системы в отличие от других:

- учитывает специфику потоков пространственно-временных данных;
- обеспечивает надежную верификацию корректного поведения программного обеспечения ГИС в среде распределенных вычислений;

- обеспечивает гибкость представления пространственно-временных данных в ГИС и дополнительные возможности построения запросов к этим данным.

Глава 3

Методология обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе

Эта глава диссертационной работы содержит описание методологии обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе, разработанной с использованием изложенных в предыдущей главе теоретических основ такой обработки. Согласно [35] понятие «методология» «имеет два основных значения: система определенных способов и приемов, применяемых в той или иной сфере деятельности (в науке, политике, искусстве и т.п.); учение об этой системе, общая теория метода, теория в действии». Другое определение, приведенное в словаре [46]: «Методология – система принципов и способов организации и построения теоретической и практической деятельности, а также учение об этой системе». Поскольку под деятельностью обычно понимается некоторая целенаправленная активность, то предварительным этапом разработки какой-либо методологии является определение цели, для достижения которой эта методология будет применяться. С определением деятельности, для организации которой разрабатывалась методология, описанная в настоящей главе, а именно с обработкой потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе, никаких неясностей уже нет – суть этой деятельности достаточно подробно разъяснена в Главе 1, следовательно необходимо определить цель, для которой нам нужно некоторым особым образом организовать эту деятельность.

Основные требования, которым должна удовлетворять разрабатываемая методология, согласно анализу, проведенному в Главе 1 настоящей работы:

- обеспечивать непрерывность обработки потенциально неограниченных потоков пространственно-временных данных, поступающих от многочисленных источников, то есть необходимо обеспечить независимость задержки получения результатов обработки от возможных изменений интенсивности поступающих данных;

- учитывать необходимость использования только решений в памяти для уменьшения задержки обработки;

- необходимо обеспечить расширяемость процесса обработки, то есть способность легкого изменения количества и состава выполняемых запросов к поступающим потокам пространственно-временных данных;

- необходимо обеспечить масштабируемость процесса обработки, то есть способность увеличивать производительность при добавлении ресурсов.

Таким образом, цель описываемой методологии – это предоставить в распоряжение разработчика геоинформационных систем методики, методы и алгоритмы, а также описание процессов, входящих в состав этой методологии, которые бы обеспечивали выполнение этих требований.

Однако, кроме достижения этой главной цели, разрабатываемая методология разумеется должна удовлетворять общим требованиям к системам обработки потоков данных в реальном времени, сформулированным в работе [147], которые де-факто рассматриваются как обязательные для разработчиков такого рода систем. В качестве подтверждения этого утверждения можно привести хороший обзор возможных инструментов области потоковой обработки данных [41].

Эти восемь требований к системе обработки потоков данных в реальном времени следующие:

1. Система должна быть в состоянии выполнять обработку данных, не прибегая к дорогостоящим операциям с внешней (дисковой) памятью.

2. В системе должен использоваться некоторый механизм поддержки запросов аналитики в режиме реального времени.

3. Система должна уметь справляться с дефектностью потоков (задержка, отсутствие и нарушение порядка данных).

4. Система должна обеспечивать детерминизм и повторяемость результатов обработки.

5. Система должна уметь интегрировать хранимые и потоковые данные.

6. Система должна обеспечивать целостность данных при сбоях.

7. Система должна обеспечивать масштабирование при возрастании интенсивности входных потоков без потребности переписывания низкоуровневого кода.

8. Система должна обеспечивать получение результатов обработки в реальном времени.

Часть этих общих требований обеспечивается выполнением основных требований, которым должна удовлетворять разрабатываемая методология, а другая часть является дополнением к ним и задает общий контекст применения разрабатываемой методологии.

Как уже говорилось в Главе 1 настоящей работы процесс обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС является лишь одним из процессов преобразования исходных пространственно-временных данных в геознание. Обсуждение смысла понятия геознания и его связь с пространственными отношениями подробно рассмотрена в [12].

В контексте настоящей работы геознание рассматривается как форма знания, связанного с пространственными отношениями на поверхности Земли, а под обработкой потоков пространственно-временных данных, как уже говорилось в Главе 1 настоящей работы и было проиллюстрировано на Рисунке 1.1, понимается выполнение различных пространственных и пространственно-временных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных, результатом которых должны быть данные об изменении пространственных отношений между объектами наблюдаемой геосистемы.

В следующем параграфе будет приведено краткое описание процессов, предшествующих процессу обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС, необходимое как для понимания самой методологии, так и условий ее применения.

3.1 Процессы, предшествующие процессу обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС

Как было уже было сказано в Главе 1 настоящей работы, новые технологические возможности сбора пространственно-временных данных с любой необходимой степенью пространственно-временной детализации связаны прежде всего с появлением и развитием распределенных сетей интеллектуальных геосенсоров. В [118] рассмотрена технология сбора исходных пространственно-временных данных в такого рода сетях.

В таких сетях, рассматривая максимально общий случай, можно выделить три типа основных узлов:

- оконечные устройства, выполняющие функции сбора данных и передачи их в сеть;
- маршрутизаторы, выполняющие функции ретрансляции данных, приходящих с оконечных устройств, к точке сбора данных (стоку);
- точки сбора данных (стоки), выполняющие функции сбора данных со всей сети и передачи их приложению верхнего уровня.

В большинстве реальных сетей узлы второго типа могут выбираться по необходимости из узлов первого типа. Практически во всех протоколах, разрабатываемых для сенсорных сетей, подразумевается, что все сенсоры обладают функцией спящего ретранслятора, которые может быть по необходимости активирован. Кроме того, узлы-маршрутизаторы осуществляют мониторинг своей области и также генерируют данные. Поэтому без ограничения общности можно считать, что сеть геосенсоров состоит из узлов двух типов – геосенсоров и стоков. Количество геосенсоров значительно превосходит количество стоков (в большинстве публикаций по тематике сенсорных сетей рассматривается один сток и сотни и даже тысячи сенсоров). Радиус передачи геосенсора значительно меньше размеров области развертывания сети. Вследствие такой конфигурации, в таких сетях есть преимущественное направление движения

передаваемого трафика, приводящее к тому, что через узлы маршрутизации, находящиеся рядом со стоками, проходит значительно больший объем трафика, чем через узлы, которые расположены дальше. Таким образом, в рассматриваемой сети возникает проблема дисбаланса энергопотребления, которая приводит к тому, что автономные элементы, располагающиеся рядом со стоками, раньше других разряжают аккумуляторы, и, тем самым уменьшают время автономной работы всей сети, причем проблема усугубляется с увеличением количества сенсоров. Для решения этой проблемы в [118] представлена математическая модель для анализа времени жизни беспроводной сети геосенсоров, использующей мобильные стоки и проведен анализ модели с точки зрения оптимизации энергопотребления сенсорами. Предложенный в этой работе подход позволяет увеличить время жизни беспроводной сети геосенсоров, оптимизируя перемещение мобильных стоков.

Следующая проблема, касающаяся процессов, предшествующих основному (с точки зрения цели настоящей работы) процессу обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС, - это проблема доставки сообщений от сети геосенсоров в подсистему обработки. Для системы сбора пространственно-временных данных с помощью сетей геосенсоров, как впрочем и для большинства других распределенных систем, характерны проблемы, связанные с процессом коммуникации между отправителем и получателем сообщения: могут быть задержки при передаче данных, неравномерность при передаче сообщений, потери данных при передаче.

В технологическом стеке, связанном с парадигмой больших данных, есть решение для этих проблем – это механизм брокеров сообщений. При использовании этого механизма потоки данных от источников не сразу попадают в систему обработки, а проходят через посредника, именуемого брокером сообщений (message broker – в англоязычной научной литературе).

Использование брокера сообщений имеет несколько преимуществ:

1. Брокер выступает в качестве буфера в случае недоступности или перегруженности получателя сообщения, а следовательно, повышает надежность системы.

2. Брокер может автоматически отправлять сообщения повторно сбойным процессам, тем самым предотвращая потерю сообщений.

3. Брокер обеспечивает возможность отправки одного сообщения нескольким получателям.

4. Брокер логически разъединяет источник и потребителя сообщения.

Существует достаточно много программного обеспечения с открытым исходным кодом, которое реализует функциональность брокеров сообщений. Это, например, RabbitMQ [139], ActiveMQ [62], HornetQ [99], NATS [60] и Apache Kafka [65].

Нюансы модели доставки зависят от реализации и конфигурации, но в целом брокеры сообщений используются следующим образом: один процесс отправляет сообщение, предназначенное для определенной очереди, а брокер обеспечивает доставку данного сообщения одному или нескольким потребителям сообщений. В одной очереди может быть много источников и много потребителей сообщений. Очередь в силу своей природы обеспечивает односторонний поток данных – от источника к потребителю. Брокеры сообщений, вообще говоря, не поддерживают какую-то конкретную модель данных — сообщение представляет собой просто байтовую последовательность с метаданными, так что можно использовать любой формат кодирования.

Таким образом, для целей разработки методологии обработки потоков пространственно-временных данных можно считать, что между сетью геосенсоров и подсистемой обработки потоков пространственно-временных данных находится брокер сообщений, который поддерживает очередь сообщений от сети геосенсоров. Такой же механизм мы будем использовать в подсистеме обработки данных для обмена сообщениями между всеми процессами, которые как предполагается могут работать параллельно.

3.2 Описание предлагаемой методологии непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе

Как уже говорилось выше, разработанная в ходе выполнения диссертационного исследования и описываемая в настоящей работе методология представляет собой методики, методы и алгоритмы, а также описание процессов, входящих в состав этой методологии. В связи с этим необходимо было решить задачу ее компактного представления. Поскольку, как уже говорилось выше, под методологией в широком смысле понимается учение об организации деятельности, а организация – это либо внутренняя упорядоченность, согласованность взаимодействия более или менее дифференцированных и автономных частей целого, обусловленная его строением, либо совокупность процессов или действий, ведущих к возникновению и совершенствованию взаимосвязей между частями целого, то методология обработки потоков пространственно-временных данных может быть компактно описана в виде некоторой концептуальной модели подсистемы геоинформационной системы, выполняющей обработку потоков пространственно-временных данных. Эта концептуальная модель представляет собой абстрактное определение рассматриваемой подсистемы ГИС, выполняющей задачу непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных, и состоит из элементов, обеспечивающих реализацию процессов разрабатываемой методологии. Методики, методы и алгоритмы, входящие в состав методологии, могут быть описаны при описании соответствующих процессов.

В качестве языка моделирования концептуальной модели, компактно и наглядно представляющей разработанную методологию, был выбран язык UML. Язык UML предоставляет возможность лаконично и максимально точно выразить передаваемую мысль без дополнительных пояснений. Семантика каждого представленного на диаграмме UML функционального блока и их взаимосвязь определены с точностью до значений которые приписаны соответствующим

элементам нотации языка UML. Результат моделирования представлен на Рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 Общий вид концептуальной модели подсистемы обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС

На представленной на Рисунке 3.1 диаграмме UML показано, что подсистема обработки потоков пространственно-временных данных в общем случае в соответствии с разработанной методологией будет включать в себя три основные части:

- Систему управления потоками данных (обозначенную на диаграмме как СУПД);
- Систему управления базой данных (обозначенную на диаграмме как СУБД);
- Блок преобразования к входному формату подсистемы предоставления результатов.

Подсистема предоставления результатов, хотя и является важной частью ГИС, но не является частью описываемой методологии обработки, и поэтому, хотя и показана на диаграмме для демонстрации функциональности Блока преобразования к входному формату подсистемы предоставления результатов, но не включена в описываемую подсистему обработки и процессы в ней далее не описываются.

СУБД используется для хранения тех данных или тех результатов обработки, которые не нужно анализировать в режиме реального времени и обеспечивает выполнение общего требования из работы [147]: «Система должна уметь интегрировать хранимые и потоковые данные».

Назначение Блока преобразования к входному формату подсистемы предоставления результатов состоит в разделении уровней абстракции между уровнем анализа обработанных данных и уровнем обработки данных, поступающих в подсистему обработки. Именно в этой части описываемой подсистемы должна быть реализована система типов пространственно-временных данных, описанная в предыдущей главе настоящей работы

В рамках СУПД выделены Подсистема автоматической валидации входных данных и Подсистема получения результата, которые более подробно описаны далее в настоящей главе.

В следующем параграфе настоящей главы приведены необходимые обоснования и пояснения к функционалу Подсистемы автоматической валидации входных данных.

3.2.1 Контроль неопределенности данных в подсистеме автоматической валидации входных данных

Неопределенность измерения – параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине. Он является наиболее важным

обобщенным параметром, характеризующий качество измерений [4, 105]. Неопределенность данных является неотъемлемым свойством пространственных и пространственно-временных данных, что неоднократно отмечалось в различных работах по геоинформатике, например в [75, 80].

Пространственно-временные данные получаемые от сетей геосенсоров не являются исключением. Например, использование для определения местоположения геосенсора глобальных навигационных спутниковых систем, приводит к ошибке измерения. При передаче данных от геосенсоров в систему обработки неопределенность данных также может измениться в результате задержки при передаче данных через каналы связи.

Для контроля уровня неопределенности данных и, если это возможно, то для уменьшения этой неопределенности, необходимо использовать механизмы автоматической валидации. Термин «валидация» определяется в [5] следующим образом: «Валидация - подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены». Таким образом, валидация данных представляет собой процесс проверки данных на соответствие некоторым критериям качества для этих данных. Разумеется, для различных предметных областей эти критерии качества данных, также как и конкретные методы автоматической валидации данных в соответствии с этими критериями могут значительно отличаться.

В задачи настоящей работы не входит разработка некоего унифицированного метода автоматической валидации для потоков пространственно-временных данных, подходящего для всех предметных областей, – большие сомнения у автора настоящей работы вызывает даже возможность получения такого результата.

Однако, как было показано при анализе представлений данных измерений и наблюдений в современных системах сбора пространственно-временных данных, проведенном в предыдущей главе настоящей работы, эти представления содержат много дополнительной информации, которая характеризует контекст наблюдения

и процедуру наблюдения. Из этих данных можно получить, например, данные о калибровке и производительности датчика, уровне заряда батареи, точности проведения измерения, скорости передачи данных и типе используемой связи. Используя эти данные и модель качества, разработанную для конкретной предметной области, можно разработать конкретные методы для их последующей реализации в подсистеме автоматической валидации входных данных.

В следующем параграфе настоящей главы приведено описание процессов в Подсистеме получения результатов.

3.2.2 Процессы в Подсистеме получения результатов

Как было показано ранее в настоящей работе, формат сообщений, образующих поток пространственно-временных данных, поступающий на вход подсистемы обработки пространственно-временных данных в ГИС, может быть без ограничения общности представлен в виде $P = (GID, Loc, Time, A)$, где:

- GID - идентификатор геосенсора;
- Loc – местоположение, связанное с наблюдением;
- Time – отметка времени, связанная с наблюдением;
- A – некоторые непространственные данные наблюдения.

Местоположение представляет собой простой пространственный объект в соответствии со спецификацией [134]. Конечно, чаще всего это будут точки (класс Point в [134]), поэтому на рисунках, иллюстрирующих некоторые дальнейшие рассуждения, именно они и будут использоваться, однако сами рассуждения проводятся для любых простых пространственных объектов, соответствующих спецификации [134], и справедливы не только для точек.

В зависимости от условий предметной области, в которой используется ГИС, мы можем рассматривать эти объекты либо в двумерном евклидовом пространстве, если в этой предметной области применима модель плоской Земли, либо в двумерном неевклидовом, когда необходимо использовать более сложные модели,

такие, как, например, поверхность эллипсоида. В дальнейшем изложении конкретная используемая модель пространства будет оговариваться дополнительно там, где это будет иметь значение.

На вход рассматриваемой подсистемы получения результатов (ППР) эти сообщения поступают после прохождения системы автоматической валидации.

Согласно требованиям, выполнение которых должна обеспечивать описываемая методология необходимо обеспечить низкую задержку получения результатов обработки и соответственно реализуемые в ППР процессы не должны использовать дисковую память. Это означает, что память является наиболее дефицитным ресурсом и в составе методологии должны быть описаны решения, повышающие эффективность ее использования.

Другими требованиями являются расширяемость процесса обработки, то есть способность легкого изменения количества и состава выполняемых запросов к поступающим потокам пространственно-временных данных, и масштабируемость процесса обработки, то есть способность увеличивать производительность при добавлении ресурсов. Для достижения этих целей необходимо сделать процессы в ППР выполняющимися независимо – современные программные среды для вычислительных кластеров предоставляют такую возможность. Таким образом каждый запрос к поступающим потокам пространственно-временных данных будет представлять собой отдельный независимый процесс все процессы выполняются параллельно. В параграфе 3.1 настоящей работы уже была обоснована необходимость применения очередей в распределенных системах, поэтому далее везде предполагается, что процессы, которые выполняются параллельно, взаимодействуют между собой асинхронным образом – через очереди сообщений.

Поскольку в общем случае в ППР непрерывно выполняется не один пространственно-временной запрос, а некоторый набор этих запросов (причем набор этих запросов может постоянно меняться), то в структуре процессов в ППР необходим процесс, который будет осуществлять координацию и распределение

входных сообщений между активными запросами. Этот процесс в настоящей работе будем называть Координатором. Кроме этого Координатор должен решать следующие задачи:

- эффективно использовать доступную память;
- регулировать нагрузку, обеспечивая независимость времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков.

Сами активные пространственные запросы могут выполняться независимо друг от друга или образовывать некоторый конвейер, но в любом случае их выполнение поддерживается отдельно от Координатора, а их взаимодействие с Координатором проходит через две очереди сообщений – очередь извещений и очередь сообщений-запросов. Взаимодействие Координатора с другими процессами Подсистемы получения результата показано на Рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 Взаимодействие процесса Координатор с другими процессами Подсистемы получения результата

На вход процесса, обозначенного на схеме как Координатор, поступает два потока – поток сообщений-данных и поток сообщений-запросов.

Обобщенный формат сообщений-данных описан выше.

Формат сообщений-запросов без ограничения общности может быть представлен в виде (QID, Region), где QID – идентификатор запроса Q, а Region – пространственная область, в которой применяется запрос Q. Далее в тексте эта область будет называться областью действия запроса. Область действия запроса определяется на основе типа запроса.

Для целей настоящей работы необходимо разделить возможные запросы на два типа: стационарные запросы и перемещающиеся запросы. Для перемещающихся запросов область действия, связана с некоторым объектом, который может перемещаться и который будем называть далее фокальным объектом запроса. Далее приведен пример, поясняющий смысл введенных терминов.

Пусть в нашу подсистему обработки пространственно-временных данных поступают данные от сети мобильных геосенсоров (это могут быть данные, например, от приложений, установленных на смартфонах волонтеров при проведении какого-нибудь исследования). Примером перемещающихся запросов могут быть запросы вида: «Выдавать данные от всех геосенсоров, находящихся не далее 100 метров от геосенсора с идентификатором ID-N» или «Выдавать данные от 10 геосенсоров, находящихся ближе всего к геосенсору с идентификатором ID-N». В этом примере фокальным объектом этих перемещающихся запросов будет геосенсор с идентификатором ID-N.

Для стационарных запросов их область действия не связана с объектом, который может перемещаться. Примером стационарных запросов к данным, поступающим от сети мобильных геосенсоров из предыдущего примера, будут запросы: «Выдавать данные от всех геосенсоров, находящихся не далее 100 метров от точки с координатами (x,y)» или «Выдавать данные от 10 геосенсоров, находящихся ближе всего к точке с координатами (x,y)».

В Главе 2 настоящей работы в результате анализа предложенной математической модели процессов непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе был сделан

вывод необходимости использовать оператор скользящего окна на основе сложного пространственного предиката для преобразования блокирующего оператора в неблокирующий.

Одной из задач Координатора и является поддержка выполнения таких операторов скользящего окна для всех активных запросов. Поскольку результатом выполнения оператора скользящего окна является некоторое актуальное для данного запроса подмножество множества входных сообщений, то должен поддерживаться некоторый механизм добавления и удаления элементов этого подмножества. В рамках описываемой методологии предлагается использовать механизм положительных и отрицательных обновлений. Выходом Координатора является поток сообщений формата (QID, \pm, P) , где QID является идентификатором запроса, который будет получать этот выходной набор, \pm указывает, является ли этот вывод положительным или отрицательным обновлением, а P – это некоторое сообщение из входного потока сообщений-данных. Чтобы снизить нагрузку на систему Координатор будет отправлять только обновление ответа, то есть он не отправляет сообщение, если ситуация не изменилась.

Поскольку, как уже говорилось выше, объем возможной оперативной памяти ограничен и считается самым дефицитным ресурсом, то одной из задач Координатора является эффективное использование этого ресурса. Достаточно логичным методом для решения этой задачи выглядит решение сохранять в памяти только те входные данные, которые требуются по крайней мере одному из активных запросов, то есть местоположение в этих данных пересекается с областью действия запроса. Однако при реализации этого решения «в лоб» могут возникнуть проблемы, описанные ниже.

Первая проблема, связана с перемещающимися запросами. На Рисунках 3.3, 3.4 и 3.5 показано взаимное расположение двух мобильных геосенсоров, обозначенных как G1 и G2 в моменты времени T1, T2 и T3 (Рисунок 3.3, Рисунок 3.4 и Рисунок 3.5 соответственно). Рамкой обозначена область действия активного перемещающегося запроса, фокальным объектом которого является геосенсор G1.

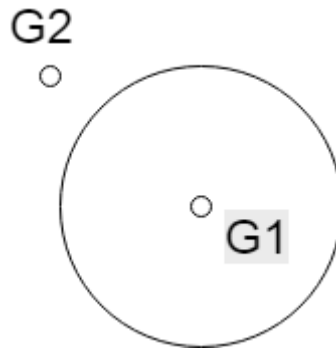


Рисунок 3.3 Взаимное расположение геосенсоров и области действия перемещающегося запроса в момент времени T1

На Рисунке 3.3 в момент времени T1 геосенсор G2 посылает сообщение P о наблюдении, в этот момент он не находится в области действия активного запроса, поэтому данные от него не будут сохранены в памяти.

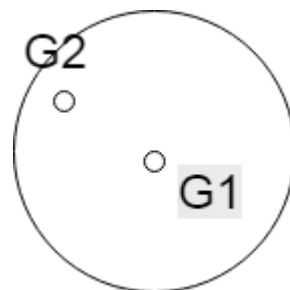


Рисунок 3.4 Взаимное расположение геосенсоров и области действия перемещающегося запроса в момент времени T2

На Рисунке 3.4 в момент времени T2 в связи с перемещением фокального объекта активного запроса – геосенсора G1, область действия перемещается и уже пересекается с местоположением, указанным в сообщении P, но оно не будет отослано активному запросу, поскольку не сохранено в памяти.

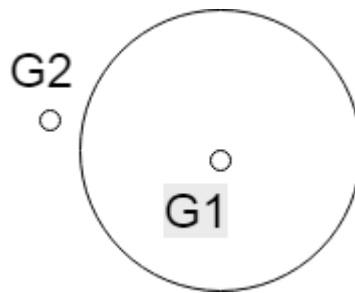


Рисунок 3.5 Взаимное расположение геосенсоров и области действия перемещающегося запроса в момент времени T3

На Рисунке 3.5 в момент времени T3 геосенсор G2 опять выходит из области действия активного запроса и вновь посылает сообщение о наблюдении, но местоположение, указанное в нем, не находится в области действия активного запроса, поэтому это сообщение не будет сохранено в памяти. Таким образом, данные от геосенсора G2 не будут обработаны активным запросом несмотря на то, что местоположение этого наблюдения в промежуток времени [T2, T3] было в области действия активного запроса.

Вторая проблема касается стационарных запросов, у которых изменяется их область действия. Проблема проиллюстрирована тремя рисунками ((Рисунок 3.6, Рисунок 3.7 и Рисунок 3.8), на которых показано взаимное расположение мобильного геосенсора G1 и области действия активного стационарного запроса в моменты времени T1, T2 и T3 соответственно.

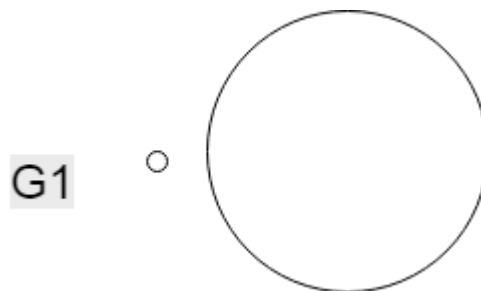


Рисунок 3.6 Взаимное расположение геосенсора и области действия стационарного запроса в момент времени T1

На Рисунке 3.6 в момент времени $T1$ геосенсор $G1$ посылает сообщение P , но местоположение в этом сообщении не находится в области действия активного запроса, поэтому данные от него не будут сохранены в памяти.

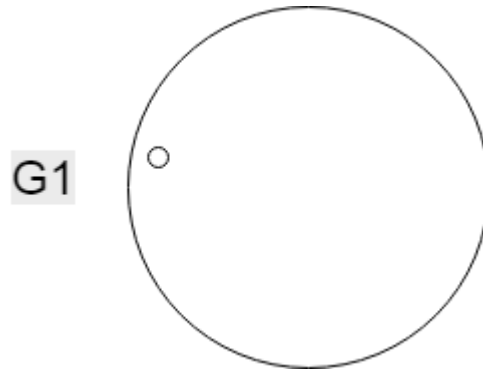


Рисунок 3.7 Взаимное расположение геосенсора и области действия стационарного запроса в момент времени $T2$

На Рисунке 3.7 в момент времени $T2$ в связи с изменением области действия активного стационарного запроса местоположение, указанное в сообщении P будет пересекаться с областью действия активного запроса, но оно не будет отослано активному запросу, поскольку не сохранено в памяти.

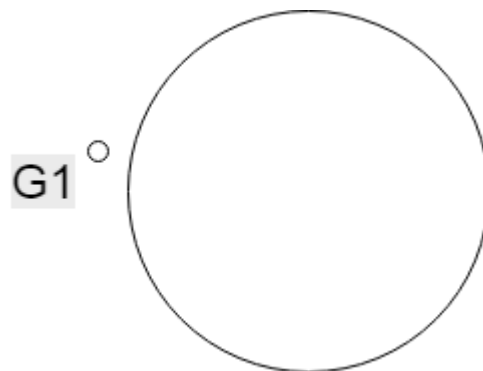


Рисунок 3.8 Взаимное расположение геосенсора и области действия стационарного запроса в момент времени $T3$

На Рисунке 3.8 в момент времени $T3$ мобильный геосенсор $G1$ выходит из области действия активного запроса и вновь посылает сообщение о наблюдении, но местоположение, указанное в нем, опять не находится в области действия активного запроса, поэтому это сообщение тоже не будет сохранено в памяти. Таким образом, данные от геосенсора $G1$ не будут обработаны активным запросом несмотря на то, что местоположение этого наблюдения в промежуток времени $[T2, T3]$ было в области действия активного запроса.

Третья проблема связана с активизацией новых запросов. Координатор не сможет выдать сразу сообщения-данные для этого запроса, поскольку до появления области действия этого запроса данные из поступающего потока, касающиеся этой области отбрасывались. Должно пройти некоторое время, значение которого определяется периодом получения наблюдений геосенсорами.

Изложенный ниже метод, являющийся частью описываемой методологии, направлен на решение первых двух проблем. В рамках рассматриваемой методологии последняя возможная проблема не рассматривается как требующая метода для своего решения. Дело в том, что в предполагаемых условиях непрерывной обработки интенсивных потоков пространственно-временных данных время самоустранения первой проблемы пренебрежимо мало по сравнению со временем непрерывного выполнения запроса и, таким образом, эта проблема не будет влиять ни на точность, ни на эффективность результата запроса.

Для решения первой и второй проблемы описываемый метод предписывает сохранять в памяти только те сообщения-данные, чье местоположение пересекается с расширенной областью действия запроса. Расширенная область действия запроса определяется как результат расширения области действия запроса во всех направлениях на максимально возможное расстояние, на которое мобильный геосенсор или возможный фокальный объект перемещающегося запроса может переместиться между любыми двумя последовательными сеансами передачи данных от геосенсора. Для определения расширенной области действия запроса достаточно знать только максимальную скорость мобильного геосенсора

или возможного фокального объекта перемещающегося запроса. Разность расширенной области действия запроса и области действия запроса будем далее называть областью интереса запроса. Использование этого метода гарантирует полноту данных, к которым применяются запросы, но в тоже время обеспечивает эффективность использования памяти.

Для реализации оператора скользящего окна на основе пространственного предиката и выполнения требования к эффективности использования памяти в составе описываемой методологии предлагается методика, описанная ниже.

Одной из задач процесса Координатор является поддержка выполнения операторов скользящего окна на основе пространственного предиката для активных запросов. Если реализовывать поддержку оператора скользящего окна для каждого запроса отдельно, то необходимо поддерживать в памяти отдельный буфер для каждого оператора запроса. С поддержкой в памяти отдельного буфера для каждого запроса память может быть исчерпана с помощью весьма небольшого количества непрерывных запросов.

Предлагаемая методика предназначена для эффективного использования памяти при обеспечении непрерывности выполнения многих пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных. Предлагаемая методика поддерживает расширяемость обработки, то есть предполагает обеспечение непрерывности выполнения увеличивающегося количества активных пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных. Суть этой методики описана ниже.

Методика включает в себя использование некоторых алгоритмов. Для описания алгоритмов, являющихся частью описываемой методики, необходимо было каким-либо образом описать структуры данных, которые предлагается использовать разработчику при реализации этих алгоритмов. Эти структуры далее описаны с той степенью конкретности, которая необходима для понимания предлагаемой логики алгоритма. Детали возможной реализации, являющиеся особенностями применения того или иного средства реализации опущены

намерено, чтобы не усложнять описания. Используемые термины типа «очередь», «множество», «список», «ассоциативный массив» не являются терминами конкретного языка программирования, а употребляются как общее наименование подобных структур.

Далее в описании будем считать, что формат сообщения P от геосенсора следующий: $P = (GID, Loc, Time, A)$, где:

GID - идентификатор геосенсора;

Loc – местоположение, связанное с наблюдением;

$Time$ – отметка времени, связанная с наблюдением;

A – некоторые непространственные данные наблюдения.

Местоположение представляет собой простой пространственный объект в соответствии со спецификацией [134]. Как уже было обосновано в Главе 1 настоящей работы, это допущение относительно формата сообщений от геосенсоров несколько не ограничивает общность дальнейших рассуждений.

Описание необходимых структур данных:

Буфер данных представляет собой структуру данных, которая обладает следующими свойствами:

1. Единица хранения в буфере данных - кортеж вида $(P, Count, FocalL)$, где:

P – сообщение от геосенсора;

$Count$ - это количество запросов, которым требуется P ;

$FocalL$ - это список активных перемещающихся запросов, для которых $P.GID$ является их фокальным объектом.

2. Буфер данных индексируется с помощью индекса пространственной сетки с одинаковым размером ячеек, то есть по значению ячейки пространственной сетки S можно получить все множество единиц хранения буфера данных $\{(P_i, Count_i, FocalL_i)\}$, таких, что для любой единицы хранения $(P_i, Count_i, FocalL_i)$ из этого множества каждое местоположение $P_i.Loc$ находится в пределах ячейки S . Конечно это множество может быть и пустым.

3. Буфер данных индексируется также по идентификаторам геосенсоров, то есть для каждого значения идентификатора геосенсора I можно получить все множество единиц хранения буфера данных $\{(P_i, Count_i, FocalL_i)\}$, таких, что для любой единицы хранения $(P_i, Count_i, FocalL_i)$ из этого множества $P_i.GID = I$. Конечно это множество может быть и пустым.

Буфер запросов представляет собой структуру данных, которая обладает следующими свойствами:

1. Единица хранения в буфере запросов - множество идентификаторов $\{QID_i\}$, где QID_i – это идентификатор запроса.

2. Буфер запросов индексируется с помощью того же индекса пространственной сетки, что и буфер данных, то есть для любого значения ячейки пространственной сетки C можно получить некоторое множество вида $\{QID_i\}$. Смысл связи ячейки C и каждого идентификатора QID_i из множества $\{QID_i\}$: она указывает на то, что эта ячейка C имеет непустое пересечение с расширенной областью действия запроса с идентификатором QID_i . Таким образом, в отличие от сообщений-данных, каждое из которых связано только с одной ячейкой сетки, идентификатор запроса связан с каждой ячейкой сетки, которая пересекается с расширенной областью действия этого запроса.

Кроме буфера данных и буфера запросов для экономии памяти согласно предлагаемой методике должна поддерживаться еще структура данных типа «ключ.значение» - глобальный ассоциативный массив $\langle QID.(R, Rexp) \rangle$, где QID – это идентификатор запроса, R – его зона действия, а $Rexp$ - его расширенная зона действия.

Ниже на Рисунке 3.9 схематично изображены действия Координатора при поступлении сообщения с данными.

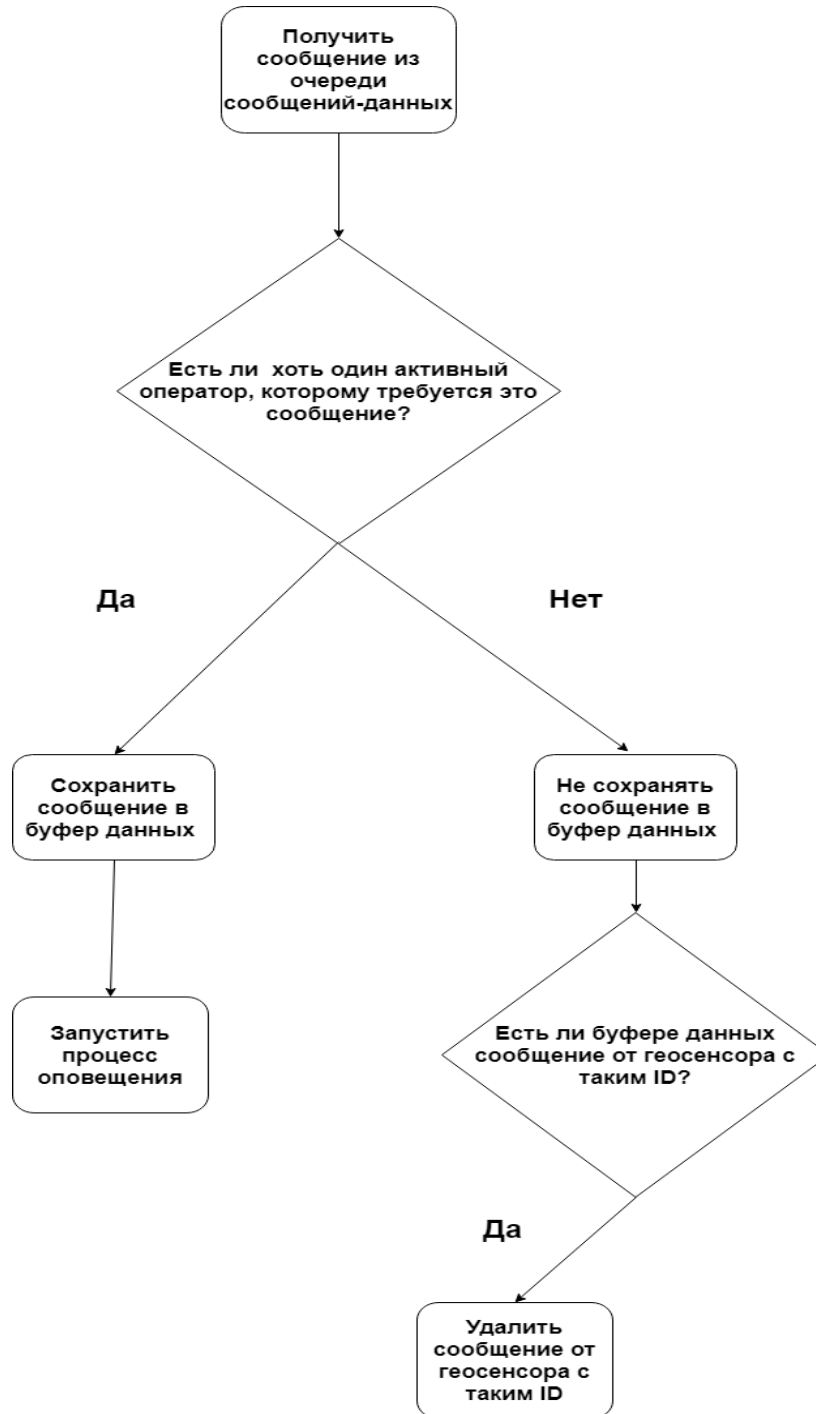


Рисунок 3.9 Схема действий Координатора при получении сообщения из очереди сообщений-данных

Для проверки, есть ли хоть один активный запрос, которому требуется поступившее сообщение P , Координатор определяет ячейку пространственной

сетки CP , в которую попадает $P.Loc$, и, используя пространственный индекс, проверяет в буфере запросов, что список, связанный с этой ячейкой, не пуст.

Похожая схема действий предполагается и при поступлении сообщения запроса. Координатор должен проверить есть ли запрос с таким QID_i в буфере запросов. Если нет, то сохранить QID_i в буфер запросов и запустить процесс оповещения. Если да, то проверить тип запроса. Если это стационарный запрос, то никаких действий не предполагается, если перемещающийся, то нужно сгенерировать зону действия и расширенную зону действия этого запроса, обновить в ассоциативном массиве зону действия и расширенную зону действия этого запроса и запустить процесс оповещения.

Таким образом, согласно описываемой методики процесс оповещения, при котором сообщения-данные передается через очередь извещений тому процессу выполняющему непрерывный запрос, которому они нужны, может быть запущен 4 типами событий:

1) В буфер данных сохранено поступившее сообщение-данные, и в буфере данных нет другого сообщение с таким GID (то есть это первое сообщение от нового геосенсора). Процесс оповещения отправляет это сообщение тем запросам, которым оно требуется (их область действия пересекается с местоположением в сообщении-запросе).

2) В буфер данных сохранено поступившее сообщение-данные и в буфере данных есть другое сообщение с таким GID (то есть это новое сообщение от переместившегося геосенсора). Процесс оповещение пересчитывает счетчик для поступившего сообщения, удаляет старое сообщение и отправляет поступившее сообщение тем запросам, которым оно требуется (их область действия пересекается с местоположением в сообщении-запросе).

3) В буфер запросов записан новый стационарный запрос Q и в буфере данных есть сообщения-данные, которые требуются этому запросу (его область действия пересекается с местоположением в этих сообщениях-данных). Процесс

оповещения отправляет обнаруженные сообщения-данные из буфера данных этому запросу.

4) Обновлена область действия и расширенная область действия перемещающегося запроса Q и в буфере данных есть сообщения-данные, которые требуются этому запросу (его новая область действия пересекается с местоположением в этих сообщениях-данных). Процесс оповещения отправляет обнаруженные сообщения-данные из буфера данных этому запросу.

Таким образом при реализации описанной методики в буфере данных хранятся только данные, необходимые по меньшей мере одному активному запросу, и данные, чье местоположение пересекается с областью интереса по крайней мере одного активного запроса. Этим достигается максимальная эффективность использования памяти при обеспечении непрерывности выполнения всех активных запросов. Применение этой методики обеспечивает и расширяемость и масштабируемость процессов обработки потоков пространственно-временных данных.

Несмотря на эффективное управление памятью и возможности для масштабирования памяти в условиях вычислительного кластера для действительного обеспечения независимости времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков методология должна предусматривать методику обработки незапланированного увеличения интенсивности входных потоков данных (или увеличения количества активных запросов). Предлагаемая методология включает в себя такую методику.

Базовая идея этой методики: в случае если ресурс доступной памяти не позволяет обеспечить непрерывность обработки, следует временно изменить правило, по которому следует сохранять данные в памяти. В основном варианте работы системы, если опустить детали уже изложенные выше, данные сохраняются в буфер данных, если они попадают в расширенную область действия хотя бы одного из активных запросов. Можно изменить это правило и сохранять только

наиболее значимые сообщения-данные, а значимость будет определяться количеством активных запросов k , с чьей зоной действия пересекается местоположение в составе этого сообщения.

Главная сложность при реализации этой идеи это метод определения этого значения k . Предлагаемый в составе описываемой методологии метод следующий:

Необходима еще одна структура данных в памяти - простой одномерный массив S , где $S [i]$ – это количество геосенсоров, чьи данные требуются i запросам.

Если необходимо освободить память для N новых объектов, то Координатор просто запускает счетчик C по массиву, инициализируя его нулем, начиная с $S [1]$, накапливая его значения в $C = C + S [k]$. Счетчик останавливается, когда значение счетчика перестает быть меньше N . По значению индекса элемента массива, на котором произошла остановка, устанавливаем значение k .

Преимуществом, такого решения – изменения уровня значимости k для сброса нагрузки, является то, что не нужно выполнять сканирование буфера данных, чтобы удалять объекты. Вместо этого объекты, не соответствующие новому уровню значимости, удаляются всякий раз, когда к ним обращаются позже в ходе выполнения. Такой подход полностью исключает временные паузы при сбросе нагрузки.

Итак, выше в составе процессов в ППР были описаны процессы, методы, методики и алгоритмы с помощью которых может быть организована обработка потоков пространственно-временных данных в ГИС на основе систем управления потоками данных. Описанные решения:

- обеспечивают эффективность использования доступной памяти и низкую задержку получения результатов обработки;
- обеспечивают расширяемость процесса обработки, то есть способность легкого изменения количества и состава выполняемых запросов к поступающим потокам пространственно-временных данных;
- обеспечивают масштабируемость процесса обработки, то есть способность увеличивать производительность при добавлении ресурсов;

- позволяют регулировать нагрузку при незапланированном увеличении интенсивности входных потоков данных (или увеличения количества активных запросов), обеспечивая независимость времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков.

Описанная методология обработки потоков пространственно-временных данных была проверена при выполнении проекта № 17-05-41156 «Комплексное геоинформационное картографирование и оценка воздействия источников загрязнения на состояние окружающей среды России», поддерживаемого совместно федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский фонд фундаментальных исследований» и Всероссийской общественной организацией «Русское географическое общество». Как указано в Справке о внедрении (Приложение 1 к настоящей работе): «Реализация разработанной в ходе выполнения диссертационной работы Матерухиным А.В. методологии обработки потоков пространственно-временных данных, решающей проблему обеспечения непрерывности такой обработки, сделало возможным создание пилотного проекта геоинформационной системы, предназначенной для непрерывной геоинформационной диагностики состояния геосистем, процессов природопользования и возникновения опасных природных процессов в различных регионах России».

3.3 Краткие выводы по Главе 3

Применение разработанной в ходе настоящего исследования методологии решает задачу обеспечения независимости времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков.

Разработанная методология обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС в отличие от применяемых:

- учитывает специфику потоков пространственно-временных данных;
- обеспечивает масштабирование обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС в зависимости от интенсивности этих потоков;
- обеспечивает производительность обработки, при которой задержка выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных не превышает некоторой величины, задаваемой предметной областью ГИС.

Глава 4

Вопросы применимости полученных научных результатов

В Главе 1 настоящей работы показано, что выявленная проблема обеспечения непрерывности обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах (ГИС) в режиме реального времени является частью общей широкой проблематики работы с большими пространственными данными, возникшей в геоинформатике. В результате проведенного анализа было показано, что уже разработанных и используемых методов обработки данных, разработанных в рамках новой научной парадигмы больших данных, было недостаточно для решения выявленной проблемы вследствие специфичности выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных. Однако разработанная методология обработки, описанная в предыдущей главе, заполняет этот пробел. Являясь геоинформационной методологией, она не только учитывает общий контекст обработки больших данных, но и рассчитана на применение соответствующего инструментария, разработанного в рамках парадигмы больших данных. Следующий параграф настоящей работы содержит результаты проведенного анализа возможных инструментов реализации разработанной методологии.

4.1 Программная среда для обработки потоков пространственно-временных данных

Общим требованием для всех разрабатываемых в рамках новой научной парадигмы больших данных методологий является требование возможной применимости этой методологии в условиях использования вычислительного кластера. Под вычислительным кластером в настоящей работе понимается группа компьютеров, объединённых высокоскоростными каналами связи и представляющих с точки зрения пользователя единый аппаратный ресурс. Решение использовать вычислительный кластер для обработки данных дает возможность легкого горизонтального масштабирования системы, но требует, в свою очередь, использования такой модели программирования, которая позволяла бы относительно легко распределять вычислительные задачи внутри большого компьютерного кластера. Поэтому для эффективной поддержки обработки интенсивных потоков пространственно-временных данных в соответствии с предложенной методологией в условиях вычислительного кластера необходима программная среда, которая поддерживает реализацию пространственно-временных типов данных, а также операций над ними, и может обеспечить легкое горизонтальное масштабирование. Под программной средой для целей настоящей работы понимается следующая программистская абстракция – это абстракция общего кода, предоставляющего некоторые функциональные возможности при его исполнении, который может быть выборочно переопределен или специализирован с помощью кода пользователя. В отличие от программных библиотек или обычных пользовательских приложений, общий поток управления задается не пользовательским кодом, а программной средой, которая имеет поведение, заданное по умолчанию.

Наиболее известными и широко применяемыми решениями для обработки больших данных в вычислительных кластерах являются проекты фонда

программного обеспечения с открытым исходным кодом Apache Software Foundation [66]. Это проекты Apache Hadoop [64] и Apache Spark [67].

Проект Apache Hadoop представляет собой набор утилит, программных библиотек и общую программную среду для разработки и выполнения распределённых программ, который позволяет организовать распределённую обработку больших наборов данных в вычислительных кластерах с использованием модели программирования MapReduce. Эта модель предполагает, что исходный набор данных делится на множество более мелких обособленных фрагментов, каждый из которых обрабатывается на отдельном узле кластера. Общая схема этой модели обработки данных изображена на Рисунке 4.1.

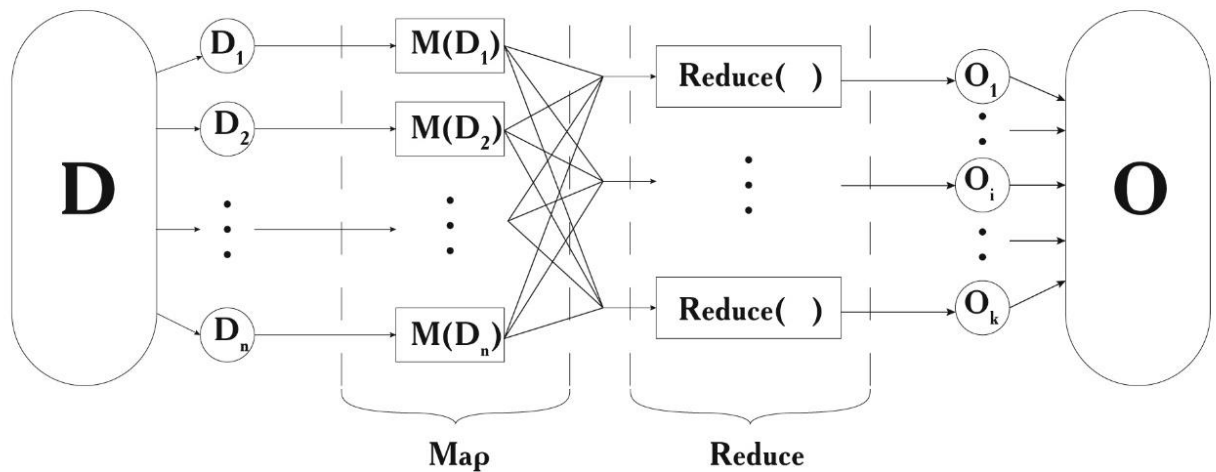


Рисунок 4.1 Модель обработки данных MapReduce

Входные данные, обозначенные на схеме как **D**, разбиваются на отдельные фрагменты D_1 , D_2 , ... D_n . К каждому фрагменту применяется один и тот же алгоритм обработки $M()$, который на выходе выдает набор пар (ключ, значение). Таким образом выполняется фаза **Map**. Затем отсортированные по ключам пары подаются на вход обработчиков **Reduce ()**, эта обработка составляет фазу **Reduce**. Полученные в результате выполнения этой фазы результаты O_1 , ... O_k образуют выходные данные – результат обработки, обозначенный на схеме как **O**.

Технология применения этой модели включает в себя не только саму модель вычислений, но и поддержку реализации этой модели, а именно:

- автоматическую нарезку входного файла с данными для последующего распараллеливания обработки этих данных;
- эффективную балансировку загрузки вычислительных узлов кластера;
- алгоритмы обеспечения отказоустойчивой работы кластера.

Распределенная обработка данных на базе Hadoop может выполняться в кластере, содержащем тысячи узлов, а объем обрабатываемого набора данных может достигать размера, измеряемого в эксабайтах. В состав проекта Hadoop входит распределенная файловая система Hadoop Distributed File system (HDFS), которая обеспечивает репликацию данных и защиту от аппаратных сбоев отдельных узлов кластера. Эта файловая система оптимизирована для работы приложений, написанных с использованием модели программирования MapReduce. Программное обеспечение, входящее в состав проекта Hadoop в настоящее время активно используется в разных крупных проектах, связанных с обработкой больших данных, например, для обработки данных в Facebook [63, 74].

Однако в проекте Hadoop изначально не была предусмотрена какая-либо поддержка выполнения пространственных запросов к пространственным или пространственно-временным данным. Для того, чтобы использовать программную среду Hadoop для этих целей, были предприняты усилия как со стороны научного сообщества, так и со стороны компаний-производителей программного обеспечения для геоинформационных систем.

Компания ESRI выпустила набор утилит GIS Tools for Hadoop [153], которые предназначены для организации взаимодействия семейства продуктов ArcGIS с программной средой Hadoop.

В работе [81] описана система Parallel-Secondo, которая представляет собой параллельную пространственную СУБД, которая использует Hadoop в качестве распределенного планировщика задач.

В работе [119] предложено ввести поддержку многомерных индексов в нереляционную базу данных HBase [96], входящую в проект Hadoop, тем самым сделав возможным выполнение некоторых пространственных запросов в программной среде Hadoop.

Проект Hadoop-GIS представляет собой расширение инфраструктуры хранилища данных Hive, входящей в экосистему проекта Hadoop. Этот проект описан в работе [79]. В базовом варианте Hive индексация ограничена, а в Hadoop-GIS поддерживается пространственный индекс, основанный на пространственной сетке с одинаковым размером ячеек, что позволяет реализовать пространственные диапазонные запросы и запросы на пространственное соединение. Однако, следует отметить, что реализация запросов с помощью таким образом устроенного индекса становится вычислительно неэффективной в случае когда пространственное распределение обрабатываемых данных отличается от равномерного.

Во всех этих упомянутых выше работах описываются решения, которые являются в некотором смысле надстройками над программной средой Hadoop, поскольку они не вносят изменений в ее базовый код. Недостатком такого подхода является то, что все эти решения наследуют ограничения и узкие места среды Hadoop, в которой, как уже было отмечено выше, не была предусмотрена обработка пространственных или пространственно-временных данных. Работы [82, 83] описывают решение SpatialHadoop, которое в отличие от описанных ранее решений представляет собой изменение базового кода программной среды Hadoop (около 14000 строк добавленного кода внутри общего кода Hadoop). SpatialHadoop - это полноценная программная среда для модели программирования MapReduce с поддержкой пространственных данных. Эта программная среда позволяет создавать и поддерживать различные варианты индексов на основе R-деревьев, что делает возможным реализацию пространственной аналитики в этой среде.

Таким образом, программная среда SpatialHadoop позволяет решить некоторые задачи обработки пространственных данных в информационно-измерительных системах с использованием вычислительных кластеров, при этом

распределение работ по узлам кластера и обеспечение отказоустойчивости будет находиться в зоне ответственности самой программной среды. Программная среда SpatialHadoop предоставляет многочисленные абстракции для доступа к вычислительным ресурсам и дисковой памяти узлов кластера, однако ей не хватает абстракций для использования распределенной памяти. Это делает эту программную среду неэффективной для важного класса приложений - тех, которые повторно используют промежуточные результаты для нескольких вычислений. В модели программирования MapReduce каждое задание считывает свои входные данные, обрабатывает его, а затем записывает обратно в распределенную файловую систему HDFS. Чтобы следующее задание использовало результат ранее запущенного задания, оно должно повторить цикл чтения, обработки и записи. Для итеративных алгоритмов модель программирования MapReduce создает значительные накладные расходы из-за репликации данных, дискового ввода-вывода и требующейся сериализации объектов. Это обстоятельство делает невозможным решение задач обработки потоков пространственно-временных данных в режиме приближенном к режиму реального времени в этой программной среде, но вполне допускает решение в этой среде задачи анализа пространственно-временных данных, накопленных за какой-то период.

Таким образом, из приведенного выше анализа можно сделать вывод, что все программные среды экосистемы Hadoop, в том числе и модифицированные специально для работы с пространственными данными, не подходят для реализации методологии обработки потоков пространственно-временных данных, описанной в предыдущей главе настоящей работы. Главная проблема, которая делает реализацию разработанной методологии невозможной – это отсутствие абстракций для использования распределенной памяти и необходимость использовать дисковый ввод-вывод для хранения промежуточных результатов.

Проект с открытым исходным кодом Apache Spark [67] предоставляет альтернативу модели программирования MapReduce для вычислительных кластеров. Этот проект первоначально разрабатывался лабораторией Университета

Калифорнии в Беркли (UC Berkeley) и был ею опубликован под лицензией BSD в 2010 году, а 2013 году передан фонду программного обеспечения с открытым исходным кодом Apache Software Foundation [66] и переведён на лицензию Apache 2.0. Идеи лежащие в основе проекта представлены в работе [145].

Программная среда Spark включает в себя множество тесно связанных компонент. Ядро этой программной среды образует его «вычислительный механизм» (в англоязычной научной литературе - computational engine), который отвечает за планирование, распределение и мониторинг приложений, выполняющих множество задач на узлах вычислительного кластера. Другие разнообразные высокоуровневые компоненты Spark, специализированные для решения разных задач, используют сервисы, предоставляемые этим «вычислительным механизмом». Общий вид архитектуры программной среды Spark показан на Рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 Общий вид архитектуры программной среды Spark

Программная среда Spark может быть запущена на вычислительном кластере в одиночном режиме или в окружении Hadoop-кластера через использование механизма YARN. В качестве уровня хранения данных этой программной средой могут быть использованы распределенная файловая система HDFS; распределенная база HBase из проекта Hadoop; распределённая система управления базами данных, относящаяся к классу NoSQL-систем Cassandra;

система управления базами данных Hive. Spark предоставляет программные интерфейсы для работы с языками Python, Java и Scala.

Базовая программная абстракция программной среды Spark – это неизменяемая отказоустойчивая коллекция объектов в памяти, которая может быть распределена между узлами вычислительного кластера. Такая коллекция объектов называется RDD [141]. Программная среда позволяет пользовательским приложениям управлять разбиением RDD на разделы для оптимизации размещения данных на узлах кластера.

В контексте обсуждаемой задачи использования вычислительных кластеров для обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС особый интерес представляет компонент Spark Streaming [144]. Он делит поток данных в реальном времени на небольшие партии продолжительностью полсекунды и запускает обработку каждой такой партии данных как серию детерминированных пакетных вычислений на малых временных интервалах. Идея такого подхода отражена на Рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 Использование пакетной обработки для работы с потоками данных

Разделенные на небольшие партии данные рассматриваются как RDD, и они обрабатываются операциями применимыми RDD. Такой подход Spark Streaming называется представлением в виде дискретизированных потоков (D-Stream).

В проекте Spark, также как в проекте Hadoop, изначально не была предусмотрена какая-либо поддержка выполнения пространственных запросов к пространственным или пространственно-временным данным. Существует, однако,

несколько проектов, основанных на программной среде Spark, которые тем или иным образом пытаются реализовать выполнение пространственной аналитики в условиях этой программной среды.

В обзоре [23] среди других проектов, связанных с программной средой Spark, описывается проект GeoSpark – проект написанный на языке Java и реализующий выполнение некоторых пространственных запросов в программной среде Spark. В качестве представлений для пространственных данных предусмотрено четыре различных типа специализированных RDD: PointRDD, RectangleRDD, PolygonRDD и CircleRDD, то есть RDD для точек, прямоугольников, полигонов и кругов соответственно. GeoSpark поддерживает R-деревья в качестве пространственных индексов, и реализует следующие пространственные запросы: диапазонные запросы, запросы присоединения с использованием предикатов, k ближайших соседей для точек. Эта модификация программной среды Spark соответствует большинству требований к программной среде реализации описанной в предыдущей главе настоящей работы методологии. Однако есть и недостатки, которые помешают легко выполнить эту реализацию. Большим недостатком GeoSpark является то, что специализированные RDD для пространственных данных могут содержать геометрии только одного определенного типа. Это делает невозможным загрузку набора данных, который содержит разные типы геометрий. Кроме того, GeoSpark поддерживает только пространственные данные, в то время как временные аспекты не могут быть смоделированы или обработаны в рамках GeoSpark. С точки зрения разработчика приложений большое неудобство GeoSpark еще и в том, что GeoSpark предоставляет интерфейс прикладного программирования (в англоязычной научной литературе - application programming interface, API), который не интегрируется в Spark, и поэтому при разработке приложения придется предусматривать его взаимодействие с двумя API, что увеличивает трудоемкость разработки и уменьшает надежность программы.

В работе [163] описывается проект *SpatialSpark*. Согласно этой работе, главная задача проекта заключалась в том, чтобы обеспечить параллельную реализацию запроса соединения для больших пространственных наборов данных. Целью такой реализации выполнения запроса пространственного соединения является максимально эффективное использование аппаратных возможностей параллельной обработки в многоядерных процессорах и графических процессорах. Чтобы получить результат объединения, рассчитывается индекс на основе R-дерева, который затем становится доступным для всех рабочих узлов кластера с использованием средств, реализованных в *Spark*. Для обеспечения выполнения запроса соединения *SpatialSpark* поддерживает диапазонные запросы, а также запросы, в которых содержатся предикаты. Запрос на *k* ближайших соседей не поддерживается. Фактически проект решает одну довольно узкую, хотя и важную задачу поддержки запроса пространственного соединения, поэтому не может рассматриваться как готовое общее решение для обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС. Однако возможности программной среды все же позволяют реализовать большую часть разработанной в настоящей работе методологии, хотя и потребуют написания дополнительного кода, реализующего недостающую функциональность.

В работе [95] описывается проект *STARK*. В качестве базовой структуры данных *STARK* использует класс ***STObject***. Этот класс используется для представления пространственной и (или) временной составляющей любого объекта реального мира. Класс содержит два поля: поле ***geo*** для хранения пространственного компонента и поле ***time*** для хранения временной составляющей объекта. Для пространственных данных не имеющих временной компоненты поле ***time*** может оставаться пустым. Чтобы добавить поддержку пространственно-временных операций в *Spark*, *STARK* предоставляет классы ***SpatialRDDFunction***, которые являются классами-«обертками» для *RDD* программной среды *Spark* и которые реализуют пространственные и пространственно-временные запросы. Класс ***SpatialRDDFunction*** реализует все пространственные операции,

поддерживаемые STARK: фильтрация, объединение, kNN, кластеризация, а также индексирование. Неявное преобразование прозрачно для пользователей и создает бесшовную интеграцию в любую программу выполняемую в среде Spark. Пользователям не нужно явно создавать экземпляр любого из классов STARK (кроме **STObject**) для использования пространственных операторов. Для внутреннего представления пространственных объектов и структур индексов STARK использует библиотеку JTS. Класс **STObject** предоставляет различные методы для проверки отношений с другими экземплярами: **intersect ()** - пересекается ли (причем проверяется пересечение как в пространственном, так и во временном домене), **contains ()** - содержит ли (проверяет, что этот объект полностью содержит другой объект, причем как в своем пространственном, так и во временном компоненте), **containedBy()** – содержится ли (реализован как обратная операция **contains ()**).

STARK легко интегрируется в программную среду Spark, предоставляя автоматические методы преобразования, которые с точки зрения разработчика пользовательского приложения, просто добавляют методы, реализующие запрос на значение пространственных и пространственно-временных предикатов к RDD в среде Spark. STARK предоставляет пользовательскому приложению возможность использования различных режимов пространственного индексирования. Сгенерированный индекс может сохраняться во внешнем хранилище программной среды Spark и снова загружаться оттуда. Пространственные запросы, реализованные в STARK, могут выполняться как с поддержкой этих индексов, так и работать с неиндексированными данными. Для повышения вычислительной эффективности выполняемое пользовательское приложение может использовать то, что STARK размещает данные по кластерам с учетом пространственной близости этих данных.

Таким образом, программная среда STARK позволяет полностью реализовать все процессы, составляющие функциональность Подсистемы получения результата, описанной в предыдущей главе настоящей работы. Однако

для реализации Блока преобразования к входному формату подсистемы предоставления результатов необходимо расширить инструментарий разработчика. Назначение Блока преобразования к входному формату подсистемы предоставления результатов состоит в разделении уровней абстракции между уровнем анализа обработанных данных и уровнем обработки данных, поступающих в подсистему обработки. Как было отмечено в предыдущей главе, при описании разработанной методологии, именно в этой части описываемой подсистемы должна быть реализована система типов пространственно-временных данных, описанная в Главе 2 настоящей работы.

По сути дела в распоряжении разработчика, использующего программную среду STARK находится только один универсальный объект для работы с пространственно-временными данными – **STObject**. Этого достаточно для организации обработки потоков пространственно-временных данных, но недостаточно для реализации сложных алгоритмов анализа результатов потоков пространственно-временных данных, а также представления результатов выполнения этих алгоритмов, и означает, что создание более сложных структур и моделей пространственно-временных данных находится в зоне ответственности кода приложения, исполняющегося в этой программной среде. Однако преимущества использования программной среды для распределенных вычислений всегда сопровождаются возникновением проблем разработки, отладки, тестирования и верификации программ, предназначенных для организации параллельной обработки в условиях кластера, который превосходит по сложности соответствующие проблемы, возникающие при разработке программ, предназначенных для выполнения на одном компьютере. Способ снизить эту сложность – предоставление разработчику подходящих программистских абстракций, а именно такой системы типов, которая не только дает ему необходимую гибкость и выразительность при написании кода, но и которая обеспечивает возможность автоматической проверки корректности написанного кода. Такая система типов была разработана в ходе выполнения

настоящей работы и описана в Главе 2 настоящей работы. Возможность интеграции этой системы типов в программную среду STARK была описана в работе [23].

Интеграция предложенной системы типов в программную среду STARK достаточно легко осуществима благодаря функциональному подходу, который был использован при разработке основы STARK – проекта Apache Spark. Конструкторы типов могут быть реализованы как параметрически полиморфные типы. Преимущества такого расширения системы классов рассматриваемой программной среды состоит не только в выразительности и гибкости предлагаемой системы типов, которая существенно снижает сложность и трудоемкость реализации различных запросов пространственной аналитики к потокам пространственно-временных данных, но и в обеспечении безопасности типизации разрабатываемых программных решений. Поскольку использование алгебраического подхода к разработке математически строгой и непротиворечивой системы типов пространственно-временных данных дает возможность автоматизировать проверку соответствия типов в программе, то применение этой разработанной системы типов снижает комбинаторную сложность тестирования программных комплексов, состоящих из различных уже отлаженных компонент. Поскольку упрощается разработка приложений для тестирования и верификации программного кода, то увеличивается полнота и надежность разработанного программного решения. Полученные в результате предложенного расширения программной среды SPARK структуры и модели пространственно-временных данных могут быть использованы при проектировании и разработке геоинформационных систем различного назначения, использующих обработку данных в вычислительных кластерах.

Проведенный в этом параграфе настоящей работы анализ возможностей практической применимости разработанной методологии обработки пространственно-временных данных в ГИС продемонстрировал возможность реализации предложенной методологии с использованием программного

обеспечения с открытым программным кодом. Наиболее подходящей программной средой для реализации этой методологией является программная среда STARK, однако для реализации разработанной методологии можно использовать, хотя и с большими усилиями, программную среду проекта SpatialSpark.

4.2 Сведения о практическом использовании полученных результатов и перспективы дальнейших исследований

Часть настоящего исследования была выполнена автором настоящей работы в ходе исследовательской работы над проектом в рамках выполнения государственного задания высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации: «Разработка геоинформационной технологии создания информационно-измерительных систем на базе распределенных сетей интеллектуальных геосенсоров» № 5.6972.2017/БЧ (Номер для публикаций: 5.6972.2017/8.9), а затем полученные результаты были применены для решения задач самого проекта. Разработанная математическая модель процессов обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе была использована при разработке математической модели процессов обработки потоков пространственно-временных данных от распределённых сетей интеллектуальных геосенсоров, а разработанная методология обработки потоков пространственно-временных данных была учтена при разработке концептуальной модели информационно-измерительной системы на базе распределенных сетей интеллектуальных геосенсоров [14, 19, 21].

Полученные в ходе выполнения настоящего исследования результаты были использованы при выполнении проекта № 17-05-41156 «Комплексное геоинформационное картографирование и оценка воздействия источников загрязнения на состояние окружающей среды России», поддерживаемого совместно федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский фонд фундаментальных исследований» и Всероссийской общественной организацией «Русское географическое общество». Как указано в Справке о внедрении (Приложение 1 к настоящей работе): «Реализация разработанной в ходе выполнения диссертационной работы Матерухиным А.В. методологии обработки потоков пространственно-временных данных, решающей проблему обеспечения

непрерывности такой обработки, сделало возможным создание пилотного проекта геоинформационной системы, предназначенной для непрерывной геоинформационной диагностики состояния геосистем, процессов природопользования и возникновения опасных природных процессов в различных регионах России. Создание таких ГИС было предусмотрено Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 - 2020 годы в разделе «138. Научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, включая ионосферу и магнитосферу Земли, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика (инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии)».

Разработанная в ходе выполнения настоящего исследования система типов пространственно-временных данных, а также методология обработки потоков пространственно-временных данных, применяется в настоящее время при работе над проектом по реализации Национальной технологической инициативы «Разработка киберфизической системы мониторинга производственных процессов в режиме реального времени на основе беспроводных сетей интеллектуальных геосенсоров» № 2.11411.2018/11.12 (Номер для публикаций: 2.11411.2018/11.12), финансируемого в рамках выполнения государственных заданий высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации. В ходе выполнения этого проекта разрабатывается система комплексных технологических решений, позволяющая обеспечить выполнение пространственных запросов к потокам пространственно-временных данных высокой и сверхвысокой интенсивности, что позволит создавать адаптивные интеллектуальные приложения для самых разных производств, которые смогут лучше управлять ресурсами и повышать эффективность производственных процессов. Достижение намеченных результатов проекта ускорит реализацию концепции Фабрик Будущего, позволив использовать научные достижения в области геоинформационных технологий для

более эффективного и результативного управления производственными процессами.

Дальнейшая разработка темы настоящей диссертационной работы возможна в двух не исключаящих друг друга направлениях - в направлении развития теоретических основ геоинформатики и в направлении разработки новых геоинформационных технологий.

С теоретической точки зрения полученные результаты открывают новую перспективную область в геоинформатике – применение новой научной парадигмы «больших данных» в контексте геоинформационных исследований. Разработанный в настоящей работе понятийный аппарат позволяет на корректном уровне абстракции формулировать возникающие не только в геоинформатике, но и шире – в науках о Земле, задачи обработки и анализа больших пространственных и пространственно-временных данных, а также предоставляет необходимые для решения этих задач методологические инструменты.

С практической точки зрения полученные результаты представляют собой основу развития новых геоинформационных технологий для решения задач сбора, анализа, преобразования, отображения и распространения пространственных и пространственно-временных данных, в которых ключевым значимым фактором является обеспечение установленного максимального времени задержки выполнения запросов пространственной аналитики к входящим потокам пространственно-временных данных независимо от интенсивности этих потоков. Это, например, задачи разработки приложений операционной аналитики, обрабатывающих и анализирующих данные от спутниковых систем наблюдения Земли [20]. Это и новые для геоинформатики задачи связанные с появлением и развитием киберфизических систем, определенные дорожными картами Национальной технологической инициативы [19]. Разработанную методологию можно применить не только для разработки систем экологического мониторинга и геоинформационного картографирования загрязнений в режиме реального времени как это было описано выше, но и для разработки систем управления

качеством воздуха в больших городах, то есть перейти от технологии фиксации происходящих изменений в геосистемах к технологии управления этими изменениями.

4.3 Краткие выводы по Главе 4

Проведенный в этой главе анализ возможностей практической применимости разработанной методологии обработки пространственно-временных данных в ГИС продемонстрировал возможность реализации предложенной методологии с использованием программного обеспечения с открытым программным кодом. Проведен анализ возможных областей применения разработанной методологии. Рекомендованные области применения включают в себя, в частности:

- изучение природных и социально-экономических геосистем, их взаимодействия и развития посредством компьютерного моделирования в режиме реального времени;
- проектирование и разработку систем управления состоянием окружающей среды;
- решение различных задач, определенных дорожными картами Национальной технологической инициативы и предполагающих непрерывную обработку потоков пространственно-временных данных в режиме реального времени.

Приведены сведения о практическом использовании полученных научных результатов.

Намечены перспективы дальнейших исследований - продолжение разработки темы настоящей диссертационной работы возможно, как в направлении развития теоретических основ геоинформатики, так и в направлении разработки новых технологий создания геоинформационных систем с целью сбора, систематизации, хранения, анализа, преобразования, отображения и распространения пространственных данных.

Заключение

Итоги исследования. В процессе выполнения исследования, описанного в настоящей диссертационной работе, были решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ проблемной ситуации, заключающейся в существовании объективного противоречия между новыми технологическими возможностями сбора пространственно-временных данных и отсутствием соответствующих технологических возможностей для непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных с возможностью выполнения пространственных запросов к этим данным в режиме реального времени.

2. Разработаны необходимые теоретические основы непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС.

3. Разработана методология непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах.

4. Выполнен анализ возможностей практической реализации разработанных теоретических основ и методологии обработки потоков пространственно-временных данных.

6. Выполнен анализ применимости разработанной методологии обработки потоков пространственно-временных данных.

В результате выполненного исследования лично автором были получены следующие научные результаты:

- введены новые понятия и термины геоинформатики, развивающие понятийный аппарат в области обработки пространственных и пространственно-временных данных;

- разработана математическая модель процессов непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС в режиме реального времени, повышающая эффективность компьютерного моделирования геосистем;

- разработана система типов пространственно-временных данных, расширяющая возможности построения запросов к потокам пространственно-временных данных при обеспечении надежной верификации корректного поведения программного обеспечения ГИС;

- разработана методология обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС, обеспечивающая независимость времени выполнения пространственных запросов к входящим потокам пространственно-временных данных от интенсивности этих потоков.

Таким образом, поставленная цель исследования - разработка теоретических основ и методологии обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационных системах, была достигнута.

Полученные научные результаты были применены при выполнении проекта № 17-05-41156 «Комплексное геоинформационное картографирование и оценка воздействия источников загрязнения на состояние окружающей среды России», поддержанного грантом РФФИ и РГО, а также при выполнении проектов в рамках выполнения государственных заданий высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации: «Разработка геоинформационной технологии создания информационно-измерительных систем на базе распределенных сетей интеллектуальных геосенсоров» № 5.6972.2017/БЧ (Номер для публикаций: 5.6972.2017/8.9) и «Разработка киберфизической системы мониторинга производственных процессов в режиме реального времени на основе беспроводных сетей интеллектуальных геосенсоров» № 2.11411.2018/11.12 (Номер для публикаций: 2.11411.2018/11.12).

Разработанные на основании выполненных автором исследований теоретические положения разрешают существующее объективное противоречие

между новыми технологическими возможностями сбора пространственно-временных данных и отсутствием соответствующих технологических возможностей для непрерывной обработки потоков пространственно-временных данных с возможностью выполнения пространственных запросов к этим данным в режиме реального времени.

Рекомендации. Рекомендуемые области применения полученных научных результатов – это разработка на их основе решений тех задач сбора, анализа, преобразования, отображения и распространения пространственных данных, в которых ключевым значимым фактором является обеспечение установленного максимального времени задержки выполнения запросов пространственной аналитики к входящим потокам пространственно-временных данных независимо от интенсивности этих потоков.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Полученные при выполнении настоящей диссертационной работы научные результаты могут быть использованы, в частности:

- при изучении природных и социально-экономических геосистем, их взаимодействия и развития посредством компьютерного моделирования в режиме реального времени;
- при проектировании и разработке систем управления состоянием окружающей среды;
- при решении различных задач, определенных дорожными картами Национальной технологической инициативы и предполагающих непрерывную обработку потоков пространственно-временных данных в режиме реального времени.

Полученные результаты открывают новую перспективную область в геоинформатике – применение новой научной парадигмы «больших данных» в контексте геоинформационных исследований. Разработанный в настоящей работе понятийный аппарат позволяет на корректном уровне абстракции формулировать

возникающие не только в геоинформатике, но и шире – в науках о Земле, задачи обработки и анализа больших пространственных и пространственно-временных данных, а также предоставляет необходимые для решения этих задач методологические инструменты.

Дальнейшая разработка темы настоящей диссертационной работы возможна как в направлении развития теоретических основ геоинформатики, так и в направлении разработки новых технологий создания геоинформационных систем с целью сбора, систематизации, хранения, анализа, преобразования, отображения и распространения пространственных данных. Это, например, задачи разработки приложений операционной аналитики, обрабатывающих и анализирующих данные от спутниковых систем наблюдения Земли. Это и новые для геоинформатики задачи, определенные дорожными картами Национальной технологической инициативы, и связанные с появлением и развитием киберфизических систем. Разработанную методологию можно применить не только для разработки систем экологического мониторинга и геоинформационного картографирования загрязнений в режиме реального времени, но и для разработки систем управления качеством воздуха в больших городах, то есть перейти от технологии мониторинга происходящих изменений в геосистемах к технологии управления этими изменениями.

Список сокращений и условных обозначений

ГИС – геоинформационная система

ППР – подсистема получения результата

СУБД – система управления базами данных

СУПД – система управления потоками данных

ISO - International Organization for Standardization

OGC - Open Geospatial Consortium

UML - Unified Modeling Language

Словарь терминов

Геосенсор: устройство с возможностью определения своего местоположения и возможностями передачи данных в централизованную систему обработки, оборудованное датчиком (сенсором), которое предназначено для получения данных о событиях, для которых пространственный аспект собранных данных имеет существенное значение

Большие пространственные данные данные о пространственных объектах и их наборах, для которых их объемы, а также скорость накопления или особенности представления ограничивают эффективный анализ с помощью реляционного подхода

Наблюдение: действие, связанное с дискретным моментом времени или с периодом, и которое присваивает наблюдаемому явлению определенное число, категорию или символ

Поток пространственно-временных данных: не более чем счетная последовательность кортежей, соответствующих схеме потока пространственно-

временных данных, упорядоченная по возрастанию значений атрибута, относящегося к временному домену

Схема потока

пространственно-

временных данных: набор атрибутов конечной арности, в котором по крайней мере один из атрибутов относится к пространственному домену, а другой атрибут относится к временному домену

Список литературы

1. Блауберг И. В., Садовский В. Н., Юдин Э. Г. Системный подход в современной науке // Проблемы методологии системных исследований. М.: Мысль, 1970. С. 7-48.
2. Господинов С. Г. Геоданные и геознания // Перспективы науки и образования. 2016. №5. с. 20-23.
3. ГОСТ Р 52438-2005. Географические информационные системы. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2006. 17 с.
4. ГОСТ Р ИСО 10576-1-2006 (ИСО 10576-1:2003). Статистические методы. Руководство по оценке соответствия установленным требованиям. Часть 1. Общие принципы. М.: Стандартинформ, 2006. – 20 с.
5. ГОСТ Р ИСО 9000–2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2015. 53 с.
6. Дейт, К. Дж. Введение в системы баз данных [Текст], 8-е издание. М.: Издательский дом "Вильямс", 2005. - 1328 с.
7. Еремеев С.В. Моделирование пространственных объектов в ГИС на основе топологических отношений // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2004. № 9-1. С. 74-79.
8. Еремеев С.В., Андрианов Д.Е., Веденин А.С. Построение и использование топологических отношений между группами пространственных объектов в геоинформационных системах // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 130-133.

9. Захаренков А.И., Шабанов А.В. Математическая модель процесса обработки геопространственных данных // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 2. С. 46-49.
10. Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: Монография. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 252 с.
11. Кулагин В.П. Геореференция в пространственных отношениях // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 5 (17). С. 80-86.
12. Кулагин В.П., Цветков В.Я. Геознание: представление и лингвистические аспекты//Информационные технологии. 2013. № 12. С. 2-9.
13. Мазуров Н. В. Разработка и исследование принципов построения центра высокопроизводительной обработки геопространственных данных: дис. ... кандидата технических наук: 25.00.35. Москва, 2005. 117 с.
14. Майоров А.А, Матерухин А.В., Гвоздев О.Г. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка геоинформационной технологии создания информационно-измерительных систем на базе распределенных сетей интеллектуальных геосенсоров» по этапу «Разработка математической модели процессов обработки потоков пространственно-временных данных от распределённых сетей интеллектуальных геосенсоров-концептуальной модели информационно-измерительной системы на базе распределённых сетей интеллектуальных геосенсоров» (регистрационный номер АААА-Б18-218011990066-3 в ЕГИСУ НИОКТР)
15. Майоров А.А. Геознание как новая форма знания // Перспективы науки и образования. 2016. № 4 (22). С. 23-31.
16. Майоров А.А., Гвоздев О.Г. Композиция методологий обобщенного и метапрограммирования как средство увеличения адаптивности процесса разработки специализированных программных систем обработки пространственных данных. // Известия вузов. Геодезия и Аэрофотосъемка. -2015. - №5. - с. 85–89.

17. Майоров А.А., Матерухин А.В. Анализ существующих технологий обработки потоков пространственно-временных данных для современных информационно-измерительных систем // Измерительная техника. 2017. № 4. с.31-34
18. Майоров А.А., Матерухин А.В. Вопросы унификации понятийного аппарата в сфере больших пространственных данных и потоков пространственно-временных данных // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2017. - № 6. - С. 95-99.
19. Майоров А.А., Матерухин А.В. Геоинформационные аспекты разработки информационно-измерительных систем на базе распределенных сетей интеллектуальных геосенсоров // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 6. С. 106-109.
20. Майоров А.А., Матерухин А.В. Использование теории систем управления потоками данных для создания приложений операционной аналитики, обрабатывающих и анализирующих данные от спутниковых систем наблюдения Земли // Вестник СГУГиТ. – 2018. - № 2. С. 108-118.
21. Майоров А.А., Матерухин А.В. Концептуальная модель информационно-измерительной системы на базе распределенных сетей интеллектуальных геосенсоров // Измерительная техника. 2018. № 5. с.26-31.
22. Майоров А.А., Матерухин А.В. Пространственные большие данные и современное российское образование в области геоинформатики. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2015. - № 6. - С. 105-108.
23. Майоров А.А., Матерухин А.В., Кондауров И.Н. Использование вычислительных кластеров для обработки потоков пространственно-временных данных в информационно-измерительных системах // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79. – № 5. – С. 54-63. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-935-5-54-63
24. Майоров А.А., Цветков В.Я. Геореференция как применение пространственных отношений в геоинформатике // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 3. С. 87-89.

25. Малинников В.А., Цветков В.Я. Динамическая модель геоданных // Науки о Земле. 2012. № 1. С. 49-53.
26. Мальцев А. И. Алгебраические системы. М.: Наука, 1970. 392 с.
27. Матерухин А.В. Алгебраический подход к разработке абстрактных типов пространственно-временных данных. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2017. - №1. - С. 114-117
28. Матерухин А.В. Математическая модель процессов обработки потоков пространственно-временных данных в геоинформационной системе // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2018. - № 2. - С. 237-243. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-2-237-243
29. Матерухин А.В. Математическая основа обработки потоков пространственно-временных данных для динамического моделирования геосистем // «Марчуковские научные чтения - 2017. Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. Новосибирск. 25 июня - 14 июля 2017». Новосибирск: Омега Принт, 2017. стр. 205.
30. Матерухин А.В. Проблематика создания ГИС на основе систем управления потоками данных. // Геодезия и картография. 2017. № 4. с. 44-47.
31. Матерухин А.В. Система типов для потоков пространственно-временных данных в виде расширенной сигнатуры многосортной алгебраической системы. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2017. - № 2. С. 121-125.
32. Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. М.: КомКнига, 2007. 192 с.
33. О философских вопросах кибернетического моделирования / И.Б. Новик. М.: Знание, 1964. 40 с.
34. Ожерельева Т.А. Геознания // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. №5 (часть 4). с.669-669.
35. Основы философии науки: Учебное пособие для аспирантов / В.П. Кохановский и др. Ростов-на Дону: Феникс, 2008. 603 с.

36. Пирс Б. Типы в языках программирования / Перевод с англ. М.: Лямбда пресс: Добросвет, 2012. 680 с.
37. Роуз Д., Степанов А. А. От математики к обобщенному программированию. М.: ДМК Пресс, 2015. 263 с.
38. Савиных В.П. Геознание. М.: МАКС Пресс, 2016. 132с.
39. Савиных В.П. Информационные пространственные отношения // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 1 (18). С. 79-88.
40. Савиных В.П., Майоров А.А., Матерухин А.В. Построение пространственной модели загрязнения воздуха на основе использования потоков данных от сетей геосенсоров // Геодезия и картография. 2017. –Т. 78. № 12. С. 39-43 . DOI: 10.22389/0016-7126-2017-930-12-39-43
41. Самарев Р.С. Обзор состояния области потоковой обработки данных // Труды Института системного программирования РАН. 2017. Т. 29. № 1. с. 231-260.
42. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
43. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем [Текст]: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
44. Таненбаум Э., Бос Х. Современные операционные системы. 4-е изд. СПб.: Питер, 2015. 1120 с
45. Федеральный закон "О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 30.12.2015 N 431-ФЗ // СПС КонсультантПлюс.
46. Философский энциклопедический словарь. М.: Сов. Энциклопедия, 1983. 840 с.
47. Хабибуллин И.Ш. Разработка Web-служб средствами Java. СПб. : БХВ-Петербург, 2003. 400 с.
48. Хатоум Т.С. Исследование методов обработки и моделирования геопро пространственных данных на основе геоинформационных систем и технологий

- : дис. ... кандидата технических наук: 25.00.32 / Хатоум Тарек Саид; [Место защиты: Сиб. гос. геодез. акад.]. Новосибирск, 2008. 145 с.
49. Цветков В.Я. Виды пространственных отношений // Успехи современного естествознания. 2013. № 5. С. 138-139.
50. Цветков В.Я. Извлечение знаний для формирования информационных ресурсов. М.: Госинформобр. 2006. 158с.
51. Цветков В.Я. Применение геоинформационных технологий для поддержки принятия решений//Геодезия и аэрофотосъемка, 2001, №4. с.128-138.
52. Цветков В.Я. Пространственные знания в науках о Земле // Международный журнал экспериментального образования. 2016. № 10-2. С. 216-219.
53. Цветков В.Я. Пространственные отношения в геоинформатике // Науки о Земле. -2012. №1. с.59-61.
54. Цветков В.Я. Формирование пространственных знаний: Монография. -М.: МАКС Пресс, 2015. 68 с.
55. Черняк, Л. Большие данные - новая теория и практика / Л. Черняк // Открытые системы. СУБД. 2011. № 10. С. 18-25
56. Шабанов А.В. Модель процесса обработки данных в геоинформационных системах // Инновации в информационно-аналитических системах. 2014. №3. [Электрон.ресурс]: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-protsesssa-obrabotki-dannyh-v-geoinformatsionnyh-sistemah> (дата обращения: 28.02.2018).
57. Шагиахметов М. Р. Основы системного мировоззрения. Системно - онтологическое обоснование. М.: КМК, 2009. 263 с.
58. Штофф, В.А. Моделирование и философия / В.А. Штофф. Л.: Наука, 1966. 301 с.
59. Щедровицкий Г. П. Принципы и общая схема методологической организации системно-структурных исследований и разработок. М.: Наука, 1981. С. 193—227.
60. About NATS. URL: <https://nats.io/about/> (дата обращения: 28.04.2018).

61. Ali M., Chandramouli B., Raman B., Katibah E. Spatio-Temporal Stream Processing in Microsoft StreamInsight. // IEEE Data Eng. Bull. - 2010. - № 33(2). – p. 69–74.
62. Apache ActiveMQ. URL: <http://activemq.apache.org> (дата обращения: 28.04.2018).
63. Apache Hadoop goes realtime at Facebook / Borthakur D., Gray J., Sarma J. S., Muthukkaruppan K., Spiegelberg N., Kuang H., Ranganathan K., Molkov D., Menon A., Rash S., Schmidt R., Aiyer A. // Proceedings of the 2011 ACM SIGMOD International Conference on Management of data (SIGMOD '11). New York, USA: ACM. pp. 1071–1080. DOI: <https://doi.org/10.1145/1989323.1989438>.
64. Apache Hadoop. [Электрон. ресурс]: <http://hadoop.apache.org> (дата обращения: 28.04.2018).
65. Apache Kafka is a distributed streaming platform. URL: <https://kafka.apache.org/intro> (дата обращения: 28.04.2018).
66. Apache Software Foundation. [Электрон. ресурс]: www.apache.org (дата обращения: 01.02.2018)
67. Apache Spark. URL: <http://spark.apache.org> (дата обращения: 01.02.2018).
68. Aurora: a new model and architecture for data stream management / Abadi D. J., Carney D., Çetintemel U., Cherniack M., Convey C., Lee S., Stonebraker M., Tatbul N., Zdonik S. // The VLDB Journal. - 2003. - vol 12 (2). - p. 120-139.
69. Batty, M. Big Data and the City // Built Environment. 2016. Vol. 42(3). pp. 321–337. DOI: 10.2148/benv.42.3.321
70. Biagioni E., Bridges K. The application of remote sensor technology to assist the recovery of rare and endangered species // . 2002. Vol. 16. No. 3. pp. 315-324. DOI=<http://dx.doi.org/10.1177/10943420020160031001>
71. Big Data Europe [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.big-data-europe.eu> (дата обращения: 28.04.2018).

72. Big Data Working Group [Электронный ресурс]. URL: <http://www.opengeospatial.org/projects/groups/bigdatadwg> (дата обращения: 28.04.2018).
73. Big Data: The Next Frontier for Innovation, Competition, and Productivity [Электронный ресурс]. – McKinsey Global Institute - 2011. - URL: http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/big_data_the_next_frontier_for_innovation (дата обращения: 28.04.2018).
74. Borthakur D. Petabyte scale databases and storage systems at Facebook // Proceedings of the 2013 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '13). New York, USA: ACM. pp. 1267-1268. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2463676.2463713>.
75. Briem G. J., Benediktsson J. A., Sveinsson J. R. (2002). Multiple classifiers applied to multisource remote sensing data // Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol.40(10). pp. 2291-2299
76. Bröring A., Remke A., Lasnia D. SenseBox – A Generic Sensor Platform for the Web of Things. //In: Puiatti A., Gu T. (eds) Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking, and Services. MobiQuitous 2011. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. 2012. V. 104. Berlin: Springer, Heidelberg. Ch. 16. P. 186–196. DOI:10.1007/978-3-642-30973-1_16
77. Codd E.F. A relational model of data for large shared data banks // Commun. ACM . - 1970. - № vol.13 #6. - p. 377-387
78. Cooper, P. Mell, Tackling Big Data, 2012, [Электронный ресурс]. URL: http://csrc.nist.gov/groups/SMA/forum/documents/june2012presentations/f%20csm_june2012_cooper_mell.pdf (дата обращения: 28.04.2018).
79. Demonstration of Hadoop-GIS: a spatial data warehousing system over MapReduce. / Aji, A., Sun, X., Vo, H., Liu, Q., Lee, R., Zhang, X., Saltz, J., Wang, F // Proceedings of the 21st ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in

- Geographic Information Systems (SIGSPATIAL'13). New York, USA: ACM, 2013. pp. 528–531. DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2525314.2525320>
80. Devillers, R. B. Towards spatial data quality information analysis tools for experts assessing the fitness for use of spatial data // International Journal of Geographical Information Science. 2007. pp. 261-282.
81. Eldawy A. Parallel Secondo: Boosting database engines with Hadoop // IEEE 18th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), Singapore, 2012. pp. 738–743. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPADS.2012.119>
82. Eldawy A. SpatialHadoop: towards flexible and scalable spatial processing using Map-Reduce // Proceedings of the 2014 SIGMOD PhD symposium (SIGMOD'14 PhD Symposium). New York, USA: ACM, 2014 pp. 46-50. DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2602622.2602625>
83. Eldawy A., Mokbel, M. F. A demonstration of SpatialHadoop: an efficient Map-Reduce framework for spatial data. // Proc. VLDB Endow., 2013. Vol. 6 (12). pp. 1230–1233. DOI=<http://dx.doi.org/10.14778/2536274.2536283>
84. Estrin D., Girod L., Pottie G., Srivastava M. Instrumenting the world with wireless sensor networks // The proceedings International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2001), Salt Lake City, Utah, May 2001. pp. 2033 – 2036.
85. Fielding R. T. Architectural Styles and the Design of Network-Based Software Architectures // PhD Thesis, University of California, Irvine, 2000 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/fielding_dissertation.pdf. (дата обращения: 28.03.2018).
86. Fielding R. T. REST APIs Must Be Hypertext-Driven. October 20 2008 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://roy.gbiv.com/untangled/2008/rest-apis-must-be-hypertext-driven> (дата обращения: 28.03.2018).
87. Frank A. U. 1999. One Step up the Abstraction Ladder: Combining Algebras - From Functional Pieces to a Whole. // In Proceedings of the International Conference on

- Spatial Information Theory: Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science (COSIT '99). - London, UK: Springer-Verlag, 1999 – p. 95-107.
88. Gantz J., Reinsel D., Extracting value from chaos. // Proc. IDC iView, 2011. pp. 1-12
89. Geospatial big data handling theory and methods: A review and research challenges / Li S., Dragicevic S., Castro F. A., Sester M., Winter S., Coltekin A., Pettit C., Jiang B., Haworth J., Stein A., Cheng T. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol.115. pp. 119-133. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.012
90. Gong J., Geng J., Chen Z. Real-time GIS data model and sensor web service platform for environmental data management // International Journal of Health Geographics. 2015. vol. 14 (2). pp. 46-59. DOI: 10.1186/1476-072X-14-2
91. Goodchild, M. F. GIS in the Era of Big Data // Cybergeog: European Journal of Geography. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <http://journals.openedition.org/cybergeog/27647> (дата обращения: 28.03.2018).
92. Guting R.H. An introduction to spatial database systems // The VLDB Journal.- 1994.- №3, 4. - p.357-399
93. Güting R.H., Böhlen M.H., Erwig M., Jensen C.S., Lorentzos N.A, Schneider M., Vazirgiannis M. A foundation for representing and quering moving objects. //ACM Trans. Database Syst. -2000. - 25 (1). -1–42 p.
94. Guting R.H., Schneider M. Moving Objects Databases. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2005. 416 p.
95. Hagedorn S., Götze P., Sattler K.-U. The STARK Framework for Spatio-Temporal Data Analytics on Spark // Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW 2017). Bonn: Gesellschaft für Informatik, 2017. pp. 123–142
96. HBase. URL: <http://hbase.apache.org> (дата обращения: 01.02.2018).
97. Hesse G., Lorenz M. Conceptual Survey on Data Stream Processing Systems // Proceedings of the IEEE 21st International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), 2015. - Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2015. – p. 797-802.

98. Hey, T., Tansley S., & Tolle, K. (Eds.). (2009). The fourth paradigm: Data-intensive scientific discovery. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/fourth-paradigm-data-intensive-scientific-discovery/> (дата обращения: 01.02.2018).
99. HornetQ Features. URL: <https://developer.jboss.org/wiki/HornetQFeatures>
100. Hu H., Wen Y., Chua T.-S., Li X. Towards scalable systems for big data analytics: a technology tutorial // IEEE Xplore Digital Library. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6842585> (дата обращения: 02.02.2017)
101. Hu H., Xu J., Lee D.L. A Generic Framework for Monitoring Continuous Spatial Queries over Moving Objects // Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD international conference on Management of data (SIGMOD '05). New York: ACM, 2005. pp. 479-490. DOI: <https://doi.org/10.1145/1066157.1066212>
102. Indexing the Positions of Continuously Moving Objects / Saltenis S., Jensen C.S., Leutenegger S.T., Lopez M.A. // Proceedings of the ACM International Conference on Management of Data (SIGMOD), 2000. pp. 331–342.
103. ISO / IEC 13249-3: 2016, «Information technology – Database languages – SQL multimedia and application packages – Part 3: Spatial (SQL/MM)» - <https://www.iso.org/standard/53698.html> (дата обращения: 01.02.2018).
104. ISO 19162: 2015, «Geographic information – Well-known text representation of coordinate reference systems» - <https://www.iso.org/standard/63094.html> (дата обращения: 01.02.2018).
105. ISO/IEC Guide 98-3:2008 (JCGM/WG1/100) Uncertainty of measurement -- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)
106. Iwerks G.S., Samet H., Smith K. Continuous KNearest Neighbor Queries for Continuously Moving Points with Updates // Proceedings of the International Conference on Very Large Data Bases, 2003. pp. 512-523

107. Jensen C.S., Lin D., Ooi B.C. Query and Update Efficient B+-Tree Based Indexing of Moving Objects // Proceedings of the International Conference on Very Large Data Bases, 2004. pp. 768-779.
108. Jiang B. Geospatial analysis requires a different way of thinking: The problem of spatial heterogeneity // GeoJournal. 2015. Vol. 80(1). pp. 1-13.
109. Kalashnikov D.V., Prabhakar S., Hambrusch S.E. Main Memory Evaluation of Monitoring Queries Over Moving Objects // Distributed and Parallel Databases. 2004. №15 (2). pp. 117–135.
110. Kortuem G., Kawsar, F., Fitton D., Sundramoorthy V. Smart Objects as Building Blocks for the Internet of Things / IEEE Internet Computing 14. 1. 2010. P. 44–51. DOI:10.1109/MIC.2009.143.
111. Kwon D., Lee S., Lee S. Indexing the Current Positions of Moving Objects Using the Lazy Update R-tree // Proceedings of the International Conference on Mobile Data Management (MDM), 2002. pp. 113–120.
112. Langran G. Time in geographic information systems. London: Taylor and Francis, 1992
113. Lazaridis I., Porkaew K., Mehrotra, S. Dynamic Queries over Mobile Objects // Proceedings of the International Conference on Extending Database Technology, (EDBT), 2002. pp. 269–286.
114. Liskov B., Zilles S. Programming with abstract data types. // In Proceedings of the ACM SIGPLAN symposium on Very high level languages. - NY, USA:ACM, 1974. - p. 50-59 DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/800233.807045>
115. Lo Re G., Peri D., Vassallo S.D. Urban Air Quality Monitoring Using Vehicular Sensor Networks. // Advances onto the Internet of Things. Switzerland: Springer International Publishing, 2014. pp.311-323 DOI: 10.1007/978-3-319-03992-3_22
116. Low-power gas sensing using carbon nanotubes in wearable devices. /Magno M., Jelicic V., Chikkadi K., Roman C., Hierold C., Bilas V., Benini L. //IEEE Sensors Journal. 2016. №16 (23). pp. 8329–8337. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2606087

117. Maiorov A.A., Materukhin A.V. Analysis of existing technologies used to process streams of spatio-temporal data for modern information measurement systems // *Measurement Techniques*. 2017. Volume 60, Issue 4, pp. 350–354 DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1200-9>
118. Materukhin A.; Shakhov V.; Sokolova O. An efficient method for collecting spatio-temporal data in the WSN using mobile sinks // *IEEE Conference Publications. Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), 2017 International Multi-Conference on*. pp. 118-120. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON.2017.8109851>
119. MD-HBase: design and implementation of an elastic data infrastructure for cloud-scale location services / Nishimura S., Das S., Agrawal D., Abbadi A. E. // *Distrib. Parallel Databases*. 2013. vol. 31, no. 2. pp. 289–319. DOI=<http://dx.doi.org/10.1007/s10619-012-7109-z>
120. Miller H. J., Goodchild M. F. Data-driven geography // *GeoJournal*. 2014. Vol.80(4). pp. 449-461.
121. Models and issues in data stream systems / Babcock B., Babu S., Datar M., Motwani R., Widom J. // *Proceedings of the twenty-first ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART symposium on Principles of database systems (PODS '02)*. New York, USA: ACM, 2002. pp. 1-16. DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/543613.543615>
122. Mokbel M.F., Xiong X., Aref W.G. SINA: Scalable Incremental Processing of Continuous Queries in Spatiotemporal Databases // *Proceedings of the ACM International Conference on Management of Data (SIGMOD)*, 2004. pp. 443–454.
123. Mouratidis K., Papadias D., Hadjieleftheriou M. Conceptual Partitioning: An Efficient Method for Continuous Nearest Neighbor Monitoring // *Proceedings of the ACM International Conference on Management of Data (SIGMOD)*, 2005. pp. 634-645. DOI: <https://doi.org/10.1145/1066157.1066230>
124. Newman S. *Building Microservices*. — O'Reilly Media, 2015., REST in Peace, SOAP. October 15, 2010 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://royal.pingdom.com/2010/10/15/rest-in-peace-soap/>.

125. Nittel S. Real-time sensor data streams. //SIGSPATIAL Special. 2015. Vol. 7 (2). pp. 22-28. DOI: <https://doi.org/10.1145/2826686.2826691>
126. Nittel, S. A Survey of Geosensor Networks: Advances in Dynamic Environmental Monitoring. //Sensors. – 2009. -№ 9. – pp. 5664–5678.
127. Oceanus: A spatio-temporal data stream system prototype / Galić Z., Mešković E., Križanović K., Baranović M. // Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on GeoStreaming. New York, USA: ACM, 2012. pp. 109–115.
128. Of Streams and Storms. [Электронный ресурс] - IBM, 2014. - URL:<https://developer.ibm.com/streamsdev/wpcontent/uploads/sites/15/2014/04/Streams-and-Storm-April-2014-Final.pdf> (дата обращения: 02.05.2018)
129. OGC 10-025r1, Observations and Measurements - XML Implementation. - [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.opengis.net/doc/IS/OMXML/2.0> (дата обращения: 01.02.2018).
130. OGC Abstract Specification Geographic information — Observations and measurements. [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.opengis.net/doc/is/om/2.0> (дата обращения: 01.02.2018).
131. OGC Sensor Web Enablement (SWE). [Электрон. ресурс]: <http://www.opengeospatial.org/ogc/markets-technologies/swe>. (дата обращения 08.12.2017).
132. OGC SensorThings API Part 1: Sensing [Электрон. ресурс]: <http://www.opengeospatial.org/standards/sensorthings>. (дата обращения 08.12.2017)
133. Open Geospatial Consortium. OpenGIS Implementation Specification for Geographic information - Simple feature access - Part 2: SQL option. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/sfs> (дата обращения: 01.02.2018).
134. Open Geospatial Consortium. OpenGIS Implementation Standard for Geographic information - Simple feature access - Part 1: Common Architecture [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/sfa> (дата обращения: 01.02.2018).

135. Paulos, E & Honicky, R.J. & Hooker, B. (2008). Citizen science: Enabling participatory urbanism. //Handbook of Research on Urban Informatics. pp. 414-436. DOI: 10.4018/978-1-60566-152-0.ch028
136. Pelekis N., Frenzos E., Giatrakos N., Theodoridis Y. HERMES: A Trajectory DB Engine for Mobility-Centric Applications. //International Journal of Knowledge-Based Organizations (IJKBO). – 2015. - 5 (2). - 19-41 p.
137. Project Summary Glacsweb [Электронный ресурс]. – URL: <https://glacsweb.org/> (дата обращения: 01.02.2018).
138. Query Indexing and Velocity Constrained Indexing: Scalable Techniques for Continuous Queries on Moving Objects. / Prabhakar S., Xia Y., Kalashnikov D.V., Aref W.G., Hambrusch S.E. // IEEE Trans. on Computers. 2002. V. 51(10). pp. 1124–1140.
139. RabbitMQ. URL: <https://www.rabbitmq.com> (дата обращения: 01.02.2018).
140. Representing situational knowledge acquired from sensor data for atmospheric phenomena // Environmental Modelling & Software / Stocker, M., Baranizadeh, E., Portin, H., Komppula, M., Ronkko, M., Hamed, A., Virtanen, A., Lehtinen, K., Laaksonen, A., Kolehmainen M. 2014. Vol. 58. pp. 27-47 <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.006>
141. Resilient distributed datasets: A fault-tolerant abstraction for in-memory cluster computing / Resilient Distributed Dataset) [Zaharia M., Chowdhury M., Das T., Dave A., Ma J., McCauley M., Franklin M. J., Shenker S., Stoica I. // Proceedings of the 9th USENIX conference on Networked Systems Design and Implementation. Berkeley, CA, USA: USENIX Association,2012. pp. 15–28.
142. Sensor Web. [Электронный ресурс]. — URL: <https://52north.org/research/research-labs/sensor-web/> (дата обращения: 01.02.2018).
143. SIGSPATIAL Special. Vol. 7 Iss. 2 / Chi-Yin (Ted) Chow (Ed.). New York, USA: ACM, 2016. 44 p.
144. Spark Streaming Programming Guide. URL: <https://spark.apache.org/docs/2.2.0/streaming-programming-guide.html> (дата обращения: 01.02.2018).

145. Spark: cluster computing with working sets / Zaharia M., Chowdhury M., Franklin M. J., Shenker S., Stoica I. // Proceedings of the 2nd USENIX conference on Hot topics in cloud computing (HotCloud'10). Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2010. p.10-10.
146. Stolze K. SQL/MM Spatial - The Standard to Manage Spatial Data in a Relational Database System. //The proceedings Database Systems for Business, Technology and Web (BTW 2003). - pp. 247–264
147. Stonebraker M., Çetintemel U., Zdonik S. The 8 requirements of real-time stream processing. // SIGMOD Rec. 2005. Vol 34 (4). pp. 42-47. DOI: <https://doi.org/10.1145/1107499.1107504>
148. STREAM: the Stanford stream data manager (demonstration description) / Arasu A., Babcock B., Babu S., Datar M., Ito K., Nishizawa I., Rosenstein J., Widom J. // Proceedings of the ACM international conference on Management of data (SIGMOD), 2003. - New York, USA: ACM, 2003. - p. 665-665
149. Supporting Frequent Updates in R-Trees: A Bottom-Up Approach / Lee M.L., Hsu W., Jensen C.S., Cui B., Teo K.L. // Proceedings of the International Conference on Very Large Data Bases, 2003. pp. 608-619.
150. Suthaharan, S. (). Big Data Classification: Problems and Challenges in Network Intrusion Prediction with Machine Learning. // Performance Evaluation Review. 2014. Vol. 41(4). pp. 70-73.
151. Tao Y., Papadias D., Shen Q. Continuous Nearest Neighbor Search // Proceedings of the International Conference on Very Large Data Bases, 2002. pp. 287–298.
152. TelegraphCQ: continuous dataflow processing / Chandrasekaran S., Cooper O., Deshpande A., Franklin M. J., Hellerstein J. M., Hong W., Krishnamurthy S., Madden S. R., Reiss F., Shah M. A. // Proceedings of the ACM international conference on Management of data (SIGMOD), 2003. - New York, USA: ACM, 2003. – p. 668-668.
153. The GIS Tools for Hadoop are a collection of GIS tools for spatial analysis of big data. URL: <https://github.com/Esri/gis-tools-for-hadoop> (дата обращения: 01.02.2018)

154. The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. /Mead M. I., Popoola O. A. M., Stewart G. B., Landshoff P., Calleja M., Hayes M., Baldovi J. J., McLeod M. W., Hodgson T. F., Dicks J. et al. //Atmospheric Environment. 2013. Vol. 70, pp. 186–203. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.11.060.
155. Uckelmann D., Harrison, M., Michahelles F. An Architectural Approach towards the Future Internet of Things // Architecting the Internet of Things; Springer-Berlin: Heidelberg, Germany, 2011. P. 1–24. DOI: 10.1007/978-3-642-19157-2_1
156. Vermesan O., Friess P. Volume Bringing IP to Low-power Smart Objects: The Smart Parking Case in the CALIPSO Project // Internet of Things Applications. From Research and Innovation to Market Deployment. The River Publishers; Aalborg, Denmark. 2014. P. 287–313.
157. Wachowicz M. Object-oriented design for temporal GIS. London: Taylor and Francis, 1999.
158. Wang, D., Cheng, T. A spatio-temporal data model for activity-based transport demand modelling // International Journal of Geographical Information Science. 2001. Vol. 15. pp. 561–85.
159. Weihrauch K.: Computable Analysis: An Introduction. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. 288 p.
160. Worboys M. F. A unified model for spatial and temporal information. // The Computer Journal 37. 1994. pp. 26–33
161. Worboys M.F. Event-oriented approaches to geographic phenomena // International Journal of Geographical Information Science. 2005. Vol.19. pp. 1–28
162. Xiong X., Mokbel M.F., Aref W.G. SEA-CNN: Scalable Processing of Continuous K-Nearest Neighbor Queries in Spatio-temporal Databases // Proceedings of the International Conference on Data Engineering (ICDE), 2005. pp. 643-654. DOI: 10.1109/ICDE.2005.128
163. You S., Zhang J., Gruenwald L. Large-scale spatial join query processing in cloud //I CDEW, 2015 pp. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDEW.2015.7129541>

164. Yuan M . Wildfire conceptual modeling for building GIS space–time models // GIS/LIS 94, Phoenix, Arizona, 1994. pp. 860–869.
165. Yuan M.: Representing geographic information to enhance GIS support for complex spatiotemporal queries // Transactions in GIS. 1999. Vol. 3. pp.37–60.
166. Yuan M. Representing complex geographic phenomena with both object- and field-like properties // Cartography and Geographic Information Science. 2001. Vol. 28. pp. 83–96.

Список иллюстративного материала

Рисунок 1.1 Место и функции процессов обработки пространственно-временных данных в обобщенной ГИС, предназначенной для мониторинга процессов в геосистемах	31
Рисунок 1.2 Модель «обработка после обязательного сохранения»	34
Рисунок 1.3 Модель обработки данных, основанная на технологии использования СУБД	37
Рисунок 1.4 Модель обработки данных, основанная на технологии использования СУПД.....	39
Рисунок 2.1 Общая модель наблюдения.....	53
Рисунок 2.2 Сущности спецификации OGC SensorThings API.....	56
Рисунок 2.3 Иерархия классов, представляющих простые геометрические объекты.....	78
Таблица 1 Множество Σ : операции (конструкторы типов).....	92
Рисунок 3.1 Общий вид концептуальной модели подсистемы обработки потоков пространственно-временных данных в ГИС.....	106
Рисунок 3.2 Взаимодействие процесса КООРДИНАТОР с другими процессами Подсистемы получения результата	111
Рисунок 3.3 Взаимное расположение геосенсоров и области действия перемещающегося запроса в момент времени T_1	114

Рисунок 3.4 Взаимное расположение геосенсоров и области действия перемещающегося запроса в момент времени T2	114
Рисунок 3.5 Взаимное расположение геосенсоров и области действия перемещающегося запроса в момент времени T3	115
Рисунок 3.6 Взаимное расположение геосенсора и области действия стационарного запроса в момент времени T1	115
Рисунок 3.7 Взаимное расположение геосенсора и области действия стационарного запроса в момент времени T2	116
Рисунок 3.8 Взаимное расположение геосенсора и области действия стационарного запроса в момент времени T3	116
Рисунок 3.9 Схема действий Координатора при получении сообщения из очереди сообщений-данных.....	121
Рисунок 4.1 Модель обработки данных MapReduce	129
Рисунок 4.2 Общий вид архитектуры программной среды Spark.....	133
Рисунок 4.3 Использование пакетной обработки для работы с потоками данных	134

Приложение

Справка о внедрении

УТВЕРЖДАЮ

Проректор МИИГАиК
по инновационному развитию
Портнов А.М.

«13» мая 20 18 года

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаю, что научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук Матерухина А.В. на тему: «Теоретические основы и методология обработки потоков пространственно-временных данных» были использованы и продолжают использоваться при выполнении проекта № 17-05-41156 «Комплексное геоинформационное картографирование и оценка воздействия источников загрязнения на состояние окружающей среды России», поддерживаемого совместно федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский фонд фундаментальных исследований» и Всероссийской общественной организацией «Русское географическое общество». Эти результаты обладают актуальностью, научной новизной, теоретической значимостью и представляют большой практический интерес.

Реализация разработанной в ходе выполнения диссертационной работы Матерухиным А.В. методологии обработки потоков пространственно-временных данных, решающей проблему обеспечения непрерывности такой обработки, сделало возможным создание пилотного проекта геоинформационной системы, предназначенной для непрерывной геоинформационной диагностики состояния геосистем, процессов природопользования и возникновения опасных природных процессов в различных регионах России. Создание таких ГИС было предусмотрено Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 - 2020 годы в разделе «138. Научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, включая ионосферу и магнитосферу Земли, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика (инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии)».

Научный руководитель проекта
«Комплексное геоинформационное картографирование и оценка воздействия источников
загрязнения на состояние окружающей среды России»,
член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор



Савиных В.П.