На правах рукописи

ГВОЗДЕВ ОЛЕГ ГЕННАДЬЕВИЧ

Исследование принципов построения и разработка архитектуры обобщенной открытой программной платформы для обработки и хранения пространственных данных

Специальность 25.00.35 — «Геоинформатика»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2015

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) на кафедре информационно-измерительных систем.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой информационно-измерительных систем
Майоров Андрей Александрович

Официальные оппоненты:

Нехин Сергей Степанович
доктор технических наук
ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД»,
начальник управления фотограмметрических исследований

Железняков Владимир Андреевич
кандидат технических наук
ЗАО КБ «Панорама», инженер-программист

Ведущая организация:

Акционерное общество
«Научно-исследовательский и производственный центр «Природа»

Защита состоится 21 января 2016 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) и на сайте: `http://miigaik.ru/nauka/dissertacionyy_sovet/zasedaniya/`

Автореферат разослан «___» _____ 20___ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета О.В. Вшивкова

Общая характеристика работы

Пространственно-временные характеристики и соотношения являются неотъемлемыми атрибутами любого материального объекта или явления. Это делает их необходимыми для решения множества задач в различных областях человеческой деятельности. Их привлечение к уже существующим решениям часто позволяет многократно повысить их качество и полноту.

В широком смысле к **системам обработки пространственных данных** могут быть отнесены любые информационные системы, использующие пространственно-временные характеристики объектов или явлений при решении стоящих перед ними задач.

Скорость роста объемов информации и изменения условий функционирования информационных систем в современном мире непрерывно увеличивается. Аппаратные и программные инструментальные средства для сбора и обработки пространственных данных становятся всё более доступны. Возрастает интерес к применению последних достижений математики и информатики, таких как интеллектуальный анализ и извлечение данных («data mining») и методы машинного обучения («machine learning»), к пространственным данным. Увеличивается заинтересованность государственных и коммерческих организаций в разработке специализированных систем обработки пространственных данных, в особенности — специализированных ГИС и систем поддержки принятия решений на их основе.

Способность в кратчайшие сроки и с минимальными затратами ресурсов адаптироваться к этим изменениям является важнейшим фактором, обеспечивающим конкурентное преимущество как на уровне индивида или организации, так и на региональном, федеральном и даже цивилизационном уровнях.

Таким образом, перед исследователями и разработчиками в области систем обработки пространственных данных особо остро встает вопрос **адаптивности автоматизированных информационных систем** — их способности реализовывать новые функциональные возможности с использованием доступных ресурсов и существующих структурных элементов, в частности —

теоретических и практических достижений смежных областей деятельности.

Наиболее актуален вопрос адаптивности в экспериментально-исследовательской и образовательной работе, на ранних этапах разработки решений промышленного и корпоративного уровня, задачах, подчиненных изменчивым внешним факторам, таким как законодательно-правовые нормы, организационно-технические характеристики внешних систем или требования заказчика.

С точки зрения системного анализа, автоматизированную информационную систему можно рассматривать как структуру, компонующуюся из постепенно укрупняющихся блоков, начиная с простейших, заканчивая большими и сложными подсистемами.

Таким образом, **адаптивность процесса конструирования программного обеспечения и разрабатываемых в его рамках решений** обеспечивается, в первую очередь, возможностью рационального, с точки зрения затрат трудовых и вычислительных ресурсов, использования существующих программных компонентов как внутренней разработки, так и внешних, наиболее приближенных к предметной области решаемой задачи, с одной стороны, и наиболее удовлетворяющих локальным организационным, технологическим и техническим потребностям, с другой.

Анализ распространенных программных решений в области обработки пространственных данных, а также технологических факторов, под влиянием которых проходит их разработка и эксплуатация, представленный в первой главе диссертационной работы, обнаружил, что существующие решения имеют принципиальные ограничения применимости и программной совместимости.

В этих условиях решение задачи построения системы обработки пространственных данных, предполагающей комбинирование функциональных возможностей множества существующих разнородных программных решений, требует значительного количества работы, направленной на преодоление технологических преград, не связанных с первоначальной задачей предметной области.

Актуальность темы в прикладном значении определяется описанными потребностями практики в увеличении адаптивности автоматизиро-

ванных информационных систем и рационализации процессов их разработки.

Актуальность темы в теоретическом значении определяется привлечением для достижения цели настоящего исследования новейших научных и прикладных разработок в области информатики и программной инженерии, модифицированных и адаптированных автором к предметной области геоинформатики.

Степень разработанности темы. Как в русскоязычных, так и в зарубежных источниках активно рассматривается проблематика обеспечения адаптивности, программной совместимости и интеграции программных решений как применительно к предметной области геоинформатики, так и в других областях деятельности. Доминирующими являются принципы, методы и подходы, находящиеся в сильной зависимости от особенностей задачи, базовых программных решений или технологий интеграции, либо, напротив, предполагающие использование универсальных решений и технологий, не учитывающих в должной мере особенности предметной области и задачи. Им свойственен недостаток внимания к вопросам рационализации трудозатрат разработчика-исследователя, обеспечению возможностей повторного использования реализованных решений, а также к технологическим свойствам и внутреннему устройству используемых технологий.

Область настоящего исследования — автоматизированные информационные системы, осуществляющие хранение и обработку пространственных данных различного типа, назначения, пространственного и тематического охвата, программное обеспечение для них, научные и методические основы геоинформатики.

Объект исследования — методологические и технологические основы проектирования и разработки программного обеспечения для автоматизированных информационных систем, осуществляющих хранение и обработку пространственных данных.

Предмет исследования — принципы построения и программная архитектура обобщенной открытой программной платформы для обработки и хранения пространственных данных, формирующей основу для построения специализированных систем обработки пространственных данных, построенных на базе композиции существующих разнородных программных компо-

нентов и решений.

Целью исследования является рационализация процессов проектирования и разработки специализированных систем автоматизированной обработки пространственных данных, построенных на основе композиции существующих разнородных программных компонентов и решений.

Для достижения этой цели понадобилось решить следующие **исследовательские задачи**:

1. Провести анализ существующих программных решений в области обработки пространственных данных, архитектурных и технологических особенностей их устройства, факторов, влияющих на возможность построения производных решений на их основе.
2. Разработать модель требований к свойствам архитектуры программной платформы для обработки и хранения пространственных данных, позволяющую обеспечить выполнимость и рациональность процессов проектирования и разработки производных программных решений, построенных на основе композиции существующих разнородных программных компонентов и решений.
3. Разработать систему методологических и технологических принципов, образующих методологическую основу построения архитектуры программной платформы для обработки и хранения пространственных данных.
4. Разработать концептуальную модель и архитектуру программной платформы для обработки и хранения пространственных данных.
5. Провести экспериментальное подтверждение правильности и практической применимости разработанной методологической основы и построенной на её базе архитектуры программной платформы для обработки и хранения пространственных данных, а также теоретических заключений относительно её свойств.

Научную базу исследования составили **методы** системного и структурного анализа, **методологии** обобщенного и метапрограммирования.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Методологическая основа проектирования и разработки программных решений в области обработки и хранения пространственных данных,

построенных на основе композиции существующих разнородных программных компонентов и решений.

2. Архитектура обобщенной открытой программной платформы для обработки и хранения пространственных данных.

Соискателем лично получены все перечисленные научные результаты.

Новизна научных результатов заключается в том, что впервые:

1. Разработана методологическая основа проектирования и разработки программных решений в области обработки и хранения пространственных данных, построенных на основе композиции существующих разнородных программных компонентов и решений, комбинирующая в себе методологии обобщенного и метапрограммирования, а также оригинальный набор принципов, дополняющих и уточняющих их приложение к предметной области геоинформатики.
2. Разработана архитектура программной платформы для обработки и хранения пространственных данных, построенная на базе разработанной методологической основы, что выражается в разделении программного интерфейса элемента данных на специализированный и обобщенный варианты, наличии метаобъектной системы, позволяющей прикладному программисту контролировать низкоуровневые аспекты процесса специализации, а также в отсутствии архитектурных свойств, увеличивающих зависимость от особенностей среды выполнения (рис. 1, 2), что обеспечивает совокупность следующих её свойств: открытость, обобщенность, управляемость и предсказуемость поведения производных решений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методологическая основа формирует теоретическую базу построения систем автоматизированной обработки пространственных данных, построенных на основе композиции существующих разнородных программных компонентов и решений, обладающих набором свойств (открытость, обобщенность, управляемость и предсказуемость поведения производных решений), совокупность которых приводит к синергетическому эффекту.

2. Разработанные архитектура и принципы построения позволяют рационализировать процессы проектирования и разработки специализированных систем автоматизированной обработки пространственных данных, построенных на основе композиции существующих разнородных программных компонентов и решений.

Достоверность научных результатов подтверждена экспериментально в четвертой части настоящего исследования.

Практическое значение научных результатов определяется тем, что их применение позволяет рационализировать процессы проектирования и разработки программного обеспечения для обработки и хранения пространственных данных, активно использующего разработанные ранние программные компоненты и решения, особенно при низком уровне их программной совместимости, позволяя при этом обеспечить совокупность свойств: открытость, обобщенность, управляемость и предсказуемость поведения производных решений.

Теоретическое значение работы определяется тем, что в её рамках произведен пересмотр проблематики проектирования и разработки программного обеспечения для автоматизированных информационных систем, производящих обработку и хранение пространственных данных, традиционно рассматриваемой в контексте прикладного программирования, с позиций теории и практики системного программирования, а также последних достижений информатики и программной инженерии.

Значимость данного подхода определяется свойствами построенной архитектуры, обеспечиваемыми созданной методологической основой: открытость, обобщенность, управляемость и предсказуемость поведения производных решений, совокупность которых приводит к синергетическому эффекту.

Данный подход и разработанная в его рамках методологическая основа могут быть развиты для применения в других научных и прикладных областях деятельности со схожей проблематикой.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и получили положительную оценку на 66-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, проходившей в марте 2011 года в Москве, и на Международной научно-технической конфе-

ренции «Геодезия, картография, кадастр — современность и перспективы», посвященной 235-летию основания МИИГАиК, проходившей в мае 2014 года в Москве.

Результаты работы использовались на третьем этапе научно-исследовательской работы «Разработка обобщенной открытой программной платформы для обработки и хранения пространственных данных» (№ УДК 01201068386), выполнявшейся по заказу Министерства образования и науки Российской Федерации. Работа завершена, положительные экспертные заключения по третьему этапу свидетельствуют о достоверности полученных результатов.

Результаты работы учитывались при проведении фундаментальных исследований по теме «Разработка метода интеграции мультиспектральных данных дистанционного зондирования оптического диапазона с радиолокационными данными с целью извлечения комплексной геопространственной информации при мониторинге территории ЧС» (регистрационный номер 10.9220.2014 от 04.02.2014).

Публикации по работе. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в четырех журнальных статьях, в том числе трех — в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка использованных терминов, условных обозначений и сокращений и трех приложений. Общий объем работы составляет 140 страниц, работа иллюстрирована 10 рисунками и содержит 12 таблиц. Список использованной литературы содержит 165 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается выбор темы диссертационной работы, её актуальность, формулируются объект и предмет исследования, её цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, апробация и результаты исследования, выносимые на защиту.

В первой главе автором проведен анализ текущего состояния иссле-

дований и разработок в области проектирования и разработки систем обработки пространственных данных как в целом, так и применительно к задачам построения программного обеспечения для систем обработки пространственных данных на основе использования композиции существующих программных решений, выполняющихся в разнородных вычислительных средах.

Проведен обзор и анализ технологических особенностей задач обработки пространственных данных: растрового и векторного представлений, способов хранения, выполнения пространственных операторов, визуализации, пространственной индексации, геокодирования, особенностей жизненного цикла как в целом, так и в реалиях Российской Федерации, в частности. Также показаны общетехнологические задачи, решение которых требуется при разработке программных систем обработки пространственных данных, такие как учет культурных, национальных и геополитических особенностей, особенностей аппаратных и программных платформ, обеспечение информационной безопасности и др.

Перечисленное наглядно демонстрирует, что технологической основой систем обработки пространственных данных является большое количество алгоритмов и структур данных как общего назначения, так и специализированных, не только имеющих высокую сложность и трудоемкость реализации, но и требующих особой квалификации специалистов, занятых их разработкой, тестированием и сопровождением. Как следствие, при разработке систем обработки пространственных данных возможность повторного использования существующих программных компонентов имеет особое значение.

Проведен обзор и анализ архитектурных факторов, влияющих на программную совместимость: в качестве наиболее общей характеристики архитектуры программного решения автором предложена **степень связанности функциональных блоков** (монолитная, компонентная, модульная), рассмотрены основные «архитектурные стили» («Unix-way», «Windows-way», «Java-way») и их особенности.

Рассмотрены особенности программной архитектуры систем массовой обработки данных, проблемы скрытого состояния и неявной программной несовместимости.

Для рассмотрения архетипов и шаблонов архитектуры межпрограм-

много взаимодействия автором предложено использование понятий **поставщика функций** и **потребителя функций**, а также разработана оригинальная классификация их возможных соотношений:

1. **заимствование исходного кода**,
2. **равноправное взаимодействие** с поставщиком функций, как с независимым **внешним сервисом**,
3. **встраивание** поставщика функций, например, в виде **разделяемой библиотеки**,
4. выполнение **под управлением** поставщика функций: программной **платформы** или **каркаса** («**фреймворка**»).

Новизна данного подхода к классификации видов взаимодействия программных решений заключается в исключении из рассмотрения технологических особенностей реализации и порядка установления и управления соединением.

На основе выявленных факторов автором была разработана оригинальная **методика оценки программной совместимости** через понятие **потенциала к повторному использованию** — комплексной характеристики свойств программного решения, обеспечивающих возможность (или невозможность) построения на его базе производных решений, являющихся потребителями его функций, включающая в себя: степень связанности функциональных блоков, поддерживаемые открытые стандарты, протоколы и форматы представления данных, неотъемлемые базовые компоненты, открытость процесса разработки, поддерживаемые способы межпрограммного взаимодействия, а также характеристики каждого из поддерживаемых программным решением способов программного взаимодействия: соотношение поставщика и потребителя функций, выразительность, полноту и производительность, развитие независимого сообщества, документированность и стандартизацию.

Автором предложены следующие выражения численных оценок выразительности M_{exp}, полноты M_{comp} и производительности M_{perf}:

$$M_{\text{exp}} = \frac{|E_{\text{предметной области}}|}{|E_{\text{предметной области}} \cup E_{\text{алгоритмические}} \cup E_{\text{служебные}}|},$$

где E — множества сущностей программного решения, участвующих во взаимодействии: $E_{\text{предметной области}}$ — сущности, соответствующие сущностям предметной области, $E_{\text{алгоритмические}}$ — сущности, минимально необходимые для реализации алгоритма, $E_{\text{служебные}}$ — сущности, обеспечивающие реализацию алгоритма с помощью конкретных технологий (итераторы, указатели и т.п.).

$$M_{\text{comp}} = \frac{|F_{\text{B}}|}{|F_1 \cup F_2 \cup \ldots \cup F_i|},$$

где F_{B} — множество функциональных возможностей, доступных с помощью рассматриваемого способа взаимодействия, а F_i — множества функциональных возможностей, предоставляемых програмным решением с помощью всех предоставляемых способов программного и интерактивного взаимодействия.

$$M_{\text{perf}} = \text{Perf}_0 \cdot \prod F_i,$$

где F_i — экспериментально определенные понижающие коэффициенты, набор которых определен факторами, негативно влияющими на производительность способа взаимодействия. В качестве эталона $\text{Perf}_0 = 1.0$ автором использовалась производительность вызова функции по соглашению cdecl.

Новизна данного подхода к оценке программной совместимости обусловлена: использованием предложенного автором понятия потенциала к повторному использованию; одновременной оценкой выразительности, полноты и производительности способа взаимодействия; оригинальной метрикой выразительности программного кода, отличающейся от существующих учетом количества привлеченных сущностей, вместо количества строк программного кода; а также учетом как архитектурно-технологических свойств, так и свойств организацонно-информационного обеспечения программного решения.

На основе разработанной методики автором был проведен сравнительный анализ программной совместимости распространенных решений в области пространственных данных: **геоинформационных систем**: ESRI ArcGis, MapInfo, GRASS GIS, QGIS, gvSIG, ГИС Панорама GIS Toolkit, TerraLib; **СУБД с пространственными расширениями**: Oracle Locator, PostgreSQL+PostGIS, Microsoft SQL Server, MySQL; **САПР**: Autodesk

AutoCad; **специализированных систем обработки геодезических измерений**: Leica GeoOffice, КРЕДО, RGS, MicroSurvey STAR*NET, GNU Gama.

На основании проведенного сравнительного анализа, анализа факторов, влияющих на программную совместимость, анализа официальной технической документации, доступных исходных кодов, опыта эксплуатации рассматриваемых программных решений, а также данных общедоступных источников, автором было установлено, что несмотря на то, что современные ГИС общего назначения активно развиваются в сторону перехода от закрытой монолитной модели к открытой многокомпонентной, их программные интерфейсы не стандартизированы и не совместимы между собой, хотя реализуют эквивалентные сущности и операции над ними, описанные стандартами OGC. Все рассмотренные решения специализируются на определенных этапах жизненного цикла пространственных данных, а также на определенных видах пространственных данных и схемах их организации. При этом, большинству из них свойственна поддержка методов межпрограммного взаимодействия, ориентированных на прикладную автоматизацию и расширение собственной функциональности, но не на интеграцию в другие системы и построение сложных композиций из существующих решений.

Таким образом, автором показано, что разработка программных решений, требующих комбинирования функциональных возможностей существующих программных решений, выполняющихся в разнородных вычислительных средах, требует значительного количества работы, направленной на решение технологических проблем, не связанных с первоначальной задачей предметной области, что не просто увеличивает трудоемкость разработки, но, учитывая высокую сложность и трудоемкость реализации технологической базы систем обработки пространственных данных «с нуля», делает принципиально невозможным рациональное решение ряда прикладных задач, таких как сопровождение пространственных данных на всех этапах жизненного цикла или построение распределенных неоднородных параллельных систем обработки и хранения пространственных данных, способных решать задачи местного, регионального и федерального уровней.

С другой стороны, автором был проведен поиск и анализ работ, непо-

средственно связанных с рассматриваемой проблемой, либо косвенно затрагивающих вопросы обеспечения программной совместимости, интеграции, интероперабельности и интерпортабельности программных решений как в области обработки пространственных данных, так и в других областях деятельности. В этих работах авторами рассматриваются принципы, методы, способы или подходы, находящиеся в сильной зависимости от предметной области, особенностей задачи, конкретного набора вовлеченных программных решений или технологий интеграции, либо, напротив, предполагающие использование универсальных решений и технологий, не учитывающих в должной мере особенности предметной области и задачи. Им свойственен недостаток внимания к таким вопросам, как рационализация трудозатрат разработчика-исследователя, в частности, обеспечение возможности повторного использования реализованных решений, а также к технологическим свойствам и внутреннему устройству используемых технологий.

При этом, как в русскоязычной, так и в зарубежной литературе автору не удалось обнаружить трудов, систематизирующих и обобщающих опыт разработки программных решений в области обработки пространственных данных, сочетающих в себе высокую степень программной совместимости, низкую зависимость от базовых решений и рационализацию трудозатрат разработчика-исследователя.

Для решения обозначенной проблемы автор предлагает исследовать альтернативный подход к построению архитектуры программных решений для обработки пространственных данных.

Во второй главе автором рассмотрена разработка методологической основы построения архитектуры программной платформы, а также концептуальной модели архитектуры, созданной на её основе.

Для формализации требований к разрабатываемой системе в обстоятельствах изначальной неопределенности её моделей использования и условий функционирования автором предложена модель требований, построенная в терминах задачи оптимизации с учетом свойств программных решений и факторов, анализ которых был проведен в первой части рассматриваемой работы.

Для разработки системы автором была создана оригинальная методо-

логическая основа, базой для которой явились методологии обобщенного и метапрограммирования, дополненные элементами контрактного и аспектно-ориентированного программирования, а также оригинальным набором принципов, уточняющих порядок приложения базовых методологий:

- принцип множественной реализации, вводящий критерий, позволяющий выявить избыточную детализацию архитектурных построений;
- принципы обобщения и поздней специализации, уточняющие порядок применения концепций обобщенного программирования при проектировании архитектуры системы и разработки её блоков и определяющие разделение концептуальных, архитектурных, технологических и технических уровней проработки решения;
- принцип прозрачных абстракций, определяющий порядок распределения ролей и способов взаимодействия между абстракциями;
- принцип свободной топологии, определяющий соотношение алгоритмов обработки данных и блоков, обеспечивающих их совместное функционирование в рамках решаемой задачи;
- принцип гарантий, уточняющий порядок применения концепций контрактного программирования и определяющий гарантии, предоставление которых алгоритмами обработки данных позволяет обеспечить надежность разрабатываемых прикладных решений и контролировать уровень сложности системы в целом и отдельных её блоков.

Новизна разработанной методологической основы заключается в комбинировании методологий обобщенного и метапрограммирования, а также в оригинальном наборе принципов, дополняющих и уточняющих их приложение к предметной области геоинформатики.

Для разрабатываемой системы автором предложено следующее **рабочее определение**: программная платформа — продукт системного программирования, представляющий собой совокупность программных решений концептуального, архитектурного, технологического и технического уровней, реализующих слои абстракций структур данных, алгоритмов и промежуточных блоков, обеспечивающий прикладного программиста средствами для построения на его основе прикладных программных решений в области обработки пространственных данных, активно использующих существующие программ-

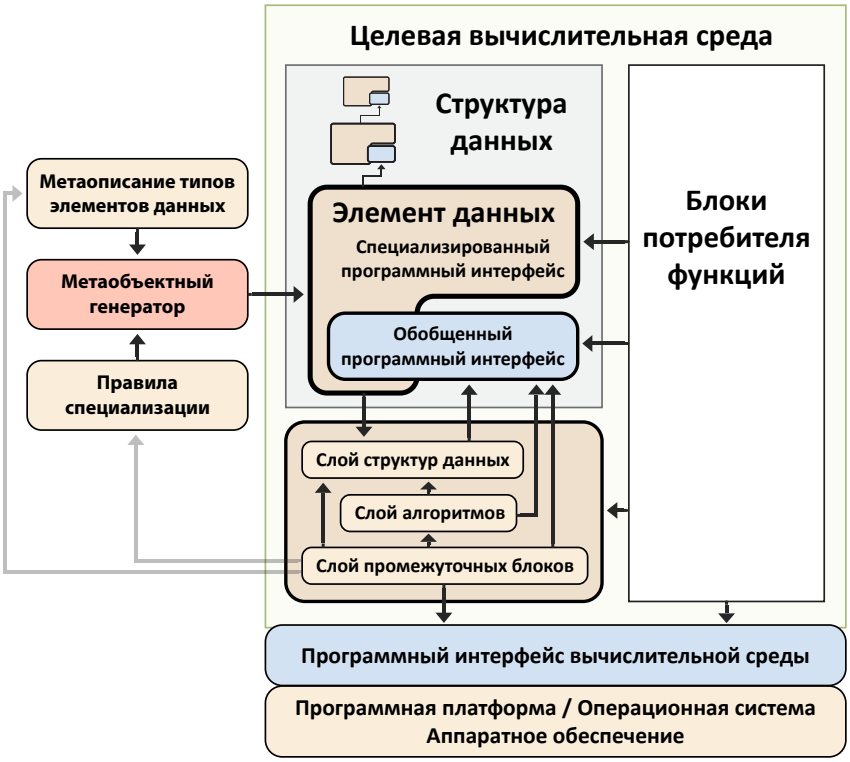

Рис. 1: Концептуальная модель архитектуры программной платформы для обработки и хранения пространственных данных

ные решения как собственной разработки, так и сторонние в рассматриваемой и смежных областях, выполняющиеся в неоднородной вычислительной среде, направленный на обеспечение повышенной программной совместимости и рационализацию процессов проектирования и разработки.

При этом, разрабатываемая программная платформа не рассматривается автором как попытка заменить или превзойти существующие универсальные или специализированные программные решения и, в частности, как инструмент конечного пользователя.

Предложенная автором концептуальная модель архитектуры программной платформы для обработки и хранения пространственных данных показана на рис. 1.

Новизна предложенной автором концептуальной модели определяется новизной методологической основы её построения и выражается в разделении программного интерфейса элемента данных на специализированный и обобщенный варианты, наличии метаобъектной системы, а также в отсутствии архитектурных свойств, увеличивающих зависимость от особенностей среды выполнения.

Автором приводится анализ недостатков методологической основы и разработанной на её базе архитектуры. В частности: высокой сложности разработки и высокого входного порога для прикладного программиста, реализации задач интерактивного взаимодействия и случаев, в которых накладные расходы на использование программной платформы превышают преимущества от её применения. Даются рекомендации, позволяющие снизить влияние этих недостатков.

В третьей главе автором подробно рассматривается порядок приложения разработанной методологической основы к разрабатываемой архитектуре, а также архитектура основных блоков программной платформы.

Автором вводится набор соглашений относительно применения парадигмы объектно-ориентированного программирования, обработки ошибок и исключительных ситуаций и поддержки параллельной обработки для различных средств разработки и вычислительных сред.

Слой структур данных предоставляет прикладному программисту инструменты и типовые решения для разработки структур данных, отвечающих требованиям конкретной задачи предметной области, а также формирует архитектурную и технологическую основу для более специализированных слоев абстракций.

Базовым понятием слоя структур данных является **элемент данных** — типизируемый и идентифицируемый объект, способный содержать поля элементарных типов данных и другие элементы данных, а также ссылки на них. Принципиальная схема архитектуры элемента данных показана на рис. 2.

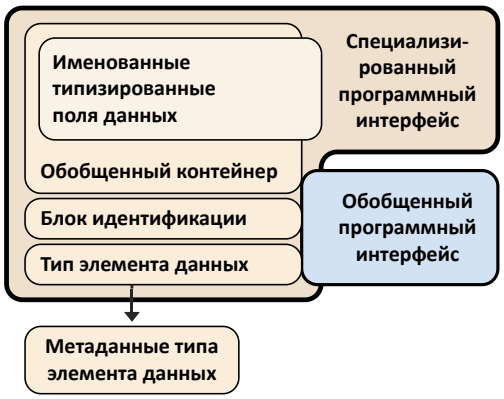

Рис. 2: Принципиальная схема архитектуры элемента данных

Автором подробно рассмотрены требования к реализации элементов данных, их основные свойства, операции над ними, а также реализация стандартизированного OGC набора пространственных объектов на их основе.

Автором рассматривается проблема реализации эквивалентных типов элементов данных для различных вычислительных сред, имеющая оценку трудоемкости $O(m \cdot n)$, где m — количество целевых вычислительных сред, а n — количество типов элементов данных.

Для решения этой проблемы автором предлагается концепция «**метаобъектной системы**» — программного решения, позволяющего автоматически сформировать программный код, реализующий элементы данных, специализированные для требований, правил и особенностей данных языка программирования и вычислительной среды, на основе их **метаописания** и **набора правил специализации**, с помощью «**метаобъектного генератора**», построенного на базе методов и технологий метапрограммирования.

Предложенный подход позволяет перейти к задаче, имеющей асимптотическую оценку трудоемкости реализации $O(m + n)$.

В качестве элементарного блока метаописаний автором предлагается понятие **метаобъекта**, позволяющее рассматривать метаописания, как структуры метаобъектов, а также предлагается использование предметно-ориентированного языка программирования (DSL), построенного на базе Python для создания и обработки структур метаобъектов.

Концептуальная модель архитектуры слоя структур данных, построенная на базе концепций элемента данных и метаобъектной системы, отражена на рис. 3.

Слой промежуточных блоков обеспечивает совместное функционирование блоков слоев структур данных и слоев алгоритмов, а также блоков, разработанных потребителем функций программной платформы (прикладным программистом) для решения единой задачи, в частности, на внутримодульном, межмодульном, межпоточном, межпроцессовом, межсеансовом, сетевом уровнях, в том числе в глобальных вычислительных сетях.

Для реализации этих функциональных возможностей автором предлагается понятие «коммуникатора» — составной сущности, абстрагирующей потребителя функций от деталей осуществления взаимодействия. Для его реа-

Рис. 3: Концептуальная модель архитектуры слоя структур данных

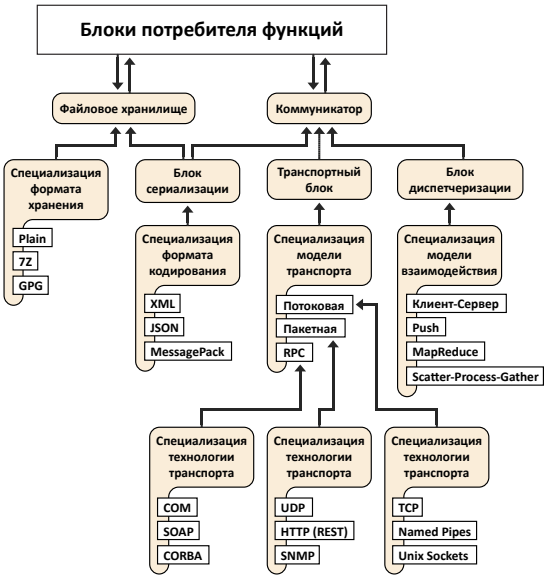

Рис. 4: Концептуальная модель архитектуры слоя промежуточных блоков

лизации с помощью методов обобщенного программирования автором предложена его декомпозиция на функциональные блоки:

Блок сериализации, отвечающий за представление данных в виде, пригодном для хранения и передачи.

Транспортный блок, отвечающий за передачу данных с использованием технологий, доступных в данной вычислительной среде.

Блок диспетчеризации, отвечающий за управление порядком и схемой коммуникации, а также за роль в ней.

Концептуальная модель архитектуры слоя промежуточных блоков представлена на рис. 4.

В заключении третьей главы автором приводится подробный анализ свойств программной платформы, обеспеченных её архитектурой:

Открытость программной платформы позволяет решениям, построенным на её базе, осуществлять взаимодействие с широким спектром программных решений как в области обработки пространственных данных, так и в смежных областях исследований и разработок.

Обобщенность программной платформы позволяет рационализировать процесс разработки решений, построенных на её базе, за счет исклю-

чения необходимости в написании множества сходных между собой технологических и технических описаний, выраженных в программном коде.

Управляемость программной платформы, а также **предсказуемость** поведения решений, построенных на её основе, позволяют исключить возможность непредсказуемого или неопределенного поведения в блоках, построенных на её базе.

Новизна разработанной архитектуры программной платформы обусловлена её проектированием в полном соответствии с разработанной методологической основой и концептуальной моделью архитектуры, что выражается в совокупности перечисленных свойств.

В четвертой главе автором проводится экспериментальное исследование свойств разработанной архитектуры обобщенной открытой программной платформы для обработки и хранения пространственных данных, а также анализ их соответствия теоретическим заключениям; проверяется её практическая применимость.

Автором была разработана методика исследования, основанная на сравнительном анализе поведения программных решений, построенных на базе функционирующего прототипа разработанной программной платформы с аналогичными программными решениями, реализованными с использованием традиционных методов разработки на специально сформированной контрольной задаче, включающей в себя элементы обработки пространственных данных средствами разрабатываемой программной платформы, взаимодействие со сторонними средствами обработки пространственных данных, а также междисциплинарные и общеприкладные задачи.

В рамках разработанной автором контрольной задачи требуется обеспечение совместного функционирования блоков, выполняющихся в **пяти** различных вычислительных средах под управлением **трех** наиболее распространенных семейств серверных и клиентских операционных систем, в рамках которого обеспечивается взаимодействие между **шестью** различными программными решениями, являющимися представителями важнейших классов программного обеспечения, реализующего обработку пространственных данных (рис. 5).

При тестировании автором проводилась оценка решений по следующим

параметрам: количество строк кода (LOC ед.), время разработки (ч.), оценка сложности программного кода (CC ед.), численно равная количеству элементарных конструкций языка программирования, составляющих решение, к объему кода в тысячах строк ($CC/KLOC$ ед.), время выполнения контрольной задачи (маш. сек.).

Результаты тестирования приведены в таб. 1 и 2.

Автором приводится подробный анализ результатов тестирования и оценки, а также опыта разработки эталонной и тестируемой реализаций, подтверждающий теоретические заключения относительно недостатков системы, её соответствия разработанной во второй части исследования модели требований, а также её ключевых свойств: **открытости**, **обощенности**, **управляемости** и **предсказуемости** поведения производных решений.

Блок	**Часть**	VM	**Выч. среда**	**Язык**	**Эталонная реализация**		**Тестовая реализация**	
					LOC	$CC/KLOC$	LOC	$CC/KLOC$
Общий код		2	GNU/Linux	Python	–	–	49	1463
1	Клиент	1	MS Windows, MFC	C++	458	1263	325	1259
	Сервер	2	GNU/Linux	Python	257	1925	103	2306
2	Сервер	2	GNU/Linux	Python	122	1461	91	1395
3	Клиент	6	Autodesk AutoCad	C++	1633	1343	958	1846
	Сервер	2	GNU/Linux	Python	129	1469	19	1402
4	Клиент	5	ESRI ArcGis	Python	416	1525	305	1894
	Сервер	2	GNU/Linux	Python	64	1439	24	1399
5	Клиент	4	GNU/Linux	Python	148	2215	95	2316
	Сервер	2	ASP.net	C#	52	1471	22	1411

Таблица 1: Результаты измерений объема и сложности программного кода эталонной и тестовой реализаций контрольной задачи.

Параметр	**Ед.**	**Эталонная реализация**	**Тестовая реализация**	**Отношение**
Время выполнения	сек.	41.203	52.617	0.78
Время разработки	ч.	13	7.5	1.73
Строки кода LOC	ед.	3279	1991	1.65
Ср. $CC/KLOC$ — C++	ед.	1303.00	1552.50	0.84
Ср. $CC/KLOC$ — Python	ед.	1548.33	1634.50	0.95
Ср. $CC/KLOC$ — C#	ед.	2215.00	2316.00	0.96

Таблица 2: Результаты тестирования эталонной и тестовой реализаций контрольной задачи.

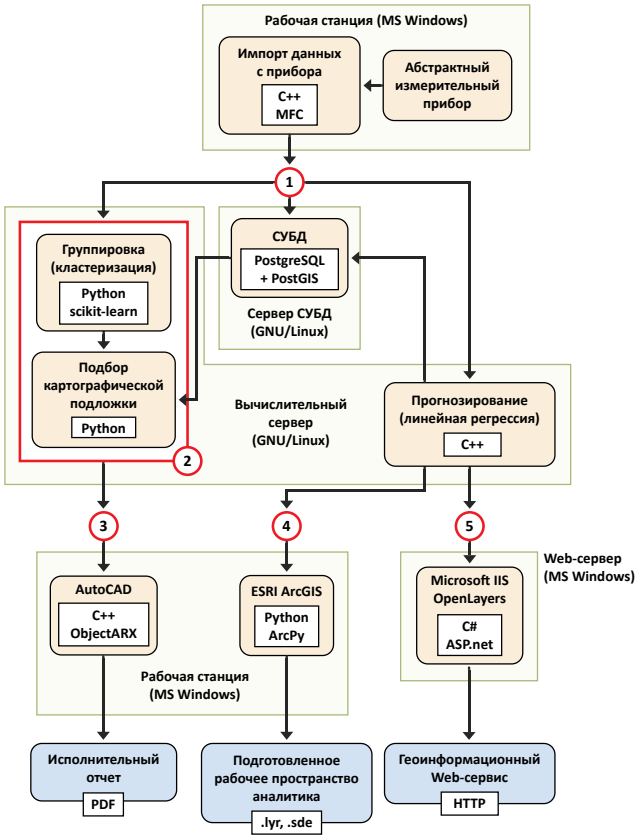

Рис. 5: Схема контрольной задачи

Заключение

Итоги. В рамках диссертационной работы получены следующие научные результаты:

1. Методологическая основа проектирования и разработки программных решений в области обработки и хранения пространственных данных, построенных на основе композиции существующих разнородных программных компонентов и решений.
2. Архитектура обобщенной открытой программной платформы для обработки и хранения пространственных данных.

Их **новизна** обеспечивается тем, что:

1. Скомбинированы методологии обобщенного и метапрограммирования, дополненные оригинальным набором, принципов уточняющих и дополняющих их применение к предметной области геоинформатики.
2. В свете положения (1) архитектурой элемента данных предусмотрено два программных интерфейса: обобщенный и специализированный, а

для программной реализации элементов данных применена метаобъектная система, позволяющая прикладному программисту управлять процессом специализации.

Получено экспериментальное подтвержение их правильности и практической применимости, а также теоретических заключений относительно её свойств.

Значимость дисертационного исследования определяется совокупностью свойств разработанной архитектуры:

Открытость программной платформы позволяет решениям, построенным на её базе, осуществлять взаимодействие с широким спектром программных решений как в области обработки пространственных данных, так и в смежных областях исследований и разработок.

Обобщенность программной платформы позволяет рационализировать процесс разработки решений за счет исключения необходимости в написании множества сходных между собой технологических и технических описаний, выраженных в программном коде.

Управляемость программной платформы, а также **предсказуемость** поведения решений, построенных на её основе, позволяют исключить возможность непредсказуемого или неопределенного поведения в блоках, построенных на её базе.

Совокупность этих свойств приводит к синергетическом эффекту, позволяющему рационализировать процессы разработки программных решений в области обработки пространственных данных за счет использования для решения отдельных подзадач наиболее подходящих для их реализации средств, методов, подходов и приемов разработки, в том числе, при низком уровне их совместимости между собой, что обеспечивает возможность произвольного задания свойств производного решения в широком диапазоне: от высокоэффективного и сложного в реализации, до минималистичного прототипного решения, что позволяет создать программную платформу, обладающую **принципиально новым для предметной области геоинформатики уровнем адаптивности**.

Рекомендации. При практическом применении результатов настоящей работы следует учитывать, что подходы, обеспечивающие архитектур-

ную и технологическую совместимость с широким спектром решений, в то же время увеличивают сложность внутреннего устройства и эксплуатации системы, а также обуславливают существенные отличия от них в части архитектурных и технологических аспектов, что существенно повышает порог вхождения для прикладных программистов.

Это может быть частично компенсировано с помощью введения регламентов и соглашений, а также глубокой технологической проработки наиболее сложных и распространенных случаев.

Перспективы дальнейших исследований автор видит в разработке более общей методологической основы построения специализированных предметно-ориентированных парадигм и моделей программирования.

Список публикаций по теме диссертаци

1. Сравнительный анализ потенциала к повторному использованию существующих решений в области обработки пространственных данных / А.А. Майоров, О.Г. Гвоздев // Известия вузов. Геодезия и Аэрофотосъемка. 2014. №4. С.81–87.
2. Сравнительный анализ технологий локальной оптимизации программ на языке Python в задачах обработки пространственных данных / А.А. Майоров, О.Г. Гвоздев // Известия вузов. Геодезия и Аэрофотосъемка. 2014. №5. С.61–69.
3. О задаче построения архитектуры обобщенной открытой программной платформы для обработки и хранения пространственных данных / О.Г. Гвоздев // Сборник статей по итогам научно-технических конференций. — Выпуск 7. — В 2-х частях. — Ч. I. — М.: МИИГАиК, 2014. — 184 с. // Приложение к журналу Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка» № 6. — 2014. С.171–174.
4. Композиция методологий обобщенного и метапрограммирования как средство увеличения адаптивности процесса разработки специализированных программных систем обработки пространственных данных / А.А. Майоров, О.Г. Гвоздев // Известия вузов. Геодезия и Аэрофотосъемка. 2015. №5. С.77–81.