

На правах рукописи



Булаев Алексей Александрович

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ 3D
ГИС И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТРЕХМЕРНОЙ СИТУАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ**

Специальность: 05.13.12 – Системы автоматизации
проектирования (промышленность)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2018

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных технологий и сетей Ульяновского государственного университета.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Телекоммуникационные технологии и сети» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»
Смагин Алексей Аркадьевич,

Официальные оппоненты: **Марков Николай Григорьевич,**
доктор технических наук, профессор, профессор Отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Похилько Александр Фёдорович,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

Ведущая организация: **АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения» (АО «УКБП»)**

Защита состоится «16» мая 2018 года в 12:00 на заседании диссертационного совета Д212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет».

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ваши отзывы и замечания по автореферату (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим направлять в адрес университета: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, ученому секретарю диссертационного совета Д212.277.01.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д212.277.01
доктор технических наук, профессор



Смирнов В. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Развитие информационных и телекоммуникационных технологий обусловило переход всех картографических и геоинформационных систем (ГИС) от 2D вида к 3D. Быстрый рост технологий разработки и создания трёхмерных геоинформационных систем (3D ГИС) влечёт за собой их применение в различных сферах жизнедеятельности человека, таких как: гражданская и военная отрасли, телекоммуникации, здравоохранение, геодезия, нефтегазовая промышленность, городское планирование, коммунальные услуги, транспорт, экология и другие.

Одной из важнейших областей применения 3D ГИС является визуализация ситуационной обстановки, под которой в работе понимается множество отображаемых объектов в различных средах (морская, наземная, воздушная), их описание и атрибуты, а под ситуацией – множество состояний объектов обстановки и их отношения. Изменение ситуационной обстановки требует её адекватного отображения в моделирующей среде, которая включает в себя возможность оценки и прогноза дальнейшего развития событий, т.е. требуются специальные средства визуального отображения ситуационной обстановки и её моделирования.

Проектирование 3D ГИС вызывает определенные трудности в силу необходимости работы с пространственными данными, 3D-моделями и отображением изменений ситуационной обстановки. Всё это требует высокой квалификации проектировщика, который знаком с проектированием информационных систем и одновременно с технологиями геоинформатики. Использование 3D ГИС отображения ситуационной обстановки позволяет улучшить качество принимаемых решений за счёт её визуализации в трёхмерном виде и возможностей её моделирования.

Сложность проектирования 3D ГИС может быть уменьшена благодаря использованию средств автоматизации проектирования, готовых разработок, опыта проектировщика и используемых на практике методов к созданию 3D ГИС, таких как CASE-средств проектирования 3D ГИС, которые уменьшают временные затраты и ресурсы на создание информационной системы, сохраняя при этом необходимые качества. Такие CASE-средства позволяют устранить трудности проектирования, сделать 3D ГИС более доступными и могут опираться на использование свободно распространяемых библиотек.

В настоящее время наиболее известны следующие организации по разработке геоинформационных систем: ESRI ArcGIS, MapInfo Professional, КБ «ПАНОРАМА», которые имеют большой опыт в визуализации двухмерной и трёхмерной ситуационных обстановок, но носят закрытый или платный характер. Среди свободно распространяемых ГИС широко известны QuantumGIS, gvSIG, GRASS GIS, но эти системы имеют ограниченный спектр возможностей (разработка сообществом программистов разного уровня, большая вероятность наличия ошибок в новых модулях, трудная расширяемость новыми функциями и форматами геоинформационных данных) для 3D-визуализации.

Результатом автоматизированного проектирования на основе CASE-средства проектирования 3D ГИС является программно-аппаратный комплекс (ПАК), который может быть использован для отображения ситуационной обстановки и включает в себя как программные средства (сама геоинформационная система, база 3D-моделей, базы растровых и векторных карт), так и аппаратные средства (персональный компьютер, включающий процессор, оперативную память, видеокарту, монитор и др.), необходимые для стабильного функционирования 3D ГИС.

Степень научной разработанности проблемы. Автор опирался на труды таких отечественных учёных как: Н.Г. Марков (Национальный исследовательский Томский

политехнический университет), И.Н. Розенберг (Московский государственный университет путей сообщения), С.Л. Беляков (Южный федеральный университет), И.К. Лурье (Московский государственный университет), В.В. Сергеев (Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева), К.В. Чистяков (Санкт-Петербургский государственный университет), В.Я. Цветков, С.Г. Дышленко, О.Л. Кузнецов и других. Наряду с отечественными работами диссертант обращался к трудам зарубежных авторов, в той или иной степени касавшихся теоретических и практических вопросов проектирования и разработки 3D ГИС: К.С. Кларье, О. Брукс, Т. Варнер, Эрик ван Рис, Б. Аллэн, Э. Скотт и других.

В работах представленных выше учёных, специалистов и их научных школ рассматриваются вопросы проектирования и разработки современных геоинформационных систем, обработки изображений и анализа геообстановки, как с использованием коммерческих продуктов, так и собственных приёмов и инструментов. Данные реализации направлены преимущественно на работу с двумерной обстановкой, подходов к моделированию которой создано достаточно много. Однако на отображение трёхмерной обстановки эти подходы не ориентированы. В связи с этим многие разработчики 3D ГИС сталкиваются с вопросом создания таких систем «с нуля» или с использованием уже существующих «движков», имеющих ограниченную функциональную расширяемость. При разработке «с нуля» требуются достаточно большие финансовые затраты и многочисленный персонал, состоящий из высококвалифицированных программистов. В случае использования готовых «движков» зачастую возникает проблема создания программного интерфейса для их взаимодействия с разрабатываемой 3D ГИС.

По единому подходу к разработке 3D ГИС, который бы в явном виде учитывал ресурсные затраты на их создание и возможность снижения требований к квалификации проектировщика, на данный момент нет достаточной информации. Отсюда возникает **проблема** создания систем автоматизации проектирования 3D ГИС для широкого класса пользователей в разных предметных областях, удовлетворяющих современным требованиям к 3D ГИС в условиях ограниченных ресурсов на проектирование и снижения требований к уровню знаний проектировщика.

Объект исследования – геоинформационные системы и технологии их проектирования в различных сферах деятельности.

Предметом исследования являются инструментальные средства автоматизации проектирования, создания и моделирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки.

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является анализ возможностей и разработка систем и средств автоматизации проектирования и моделирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки для снижения временных и финансовых затрат, уменьшения сложности проектирования и уровня знаний проектировщика.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

- 1) исследование методов создания и функционирования 3D ГИС отображения морской, наземной и воздушной обстановок с использованием современных информационных технологий и широко применяемых форматов геоинформационных данных;
- 2) разработка функционально-ресурсной двухкомпонентной модели проектирования 3D ГИС, обеспечивающей формирование функциональных покрытий проектируемой системы и поиск среди них наиболее оптимального по выбранным проектировщиком критериям;

- 3) разработка системы автоматизации проектирования 3D ГИС на основе двухкомпонентной функционально-ресурсной модели, обеспечивающей снижение ресурсных затрат (время, финансы) и требований к разработчику, выполняющей генерацию и оценку проектных решений для последующей их программной реализации;
- 4) разработка алгоритмов проектирования 3D ГИС, моделей и диаграмм проектных решений, формирующих базу для создания специализированного CASE-средства проектирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки и генерации проектных решений и исходных кодов файлов заголовков для последующей разработки на их основе 3D ГИС;
- 5) разработка специализированного CASE-средства проектирования 3D ГИС, обеспечивающего формирование и оценку готовых проектных решений, отвечающих требованиям на разработку 3D ГИС;
- 6) разработка алгоритмов функционирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки, реализующих многорежимный приём и обработку данных и обеспечивающих отображение морской, наземной и воздушной ситуационных обстановок с заданной точностью;
- 7) разработка системы 3D-моделирования и оценки проектных решений, обеспечивающих визуализацию трёхмерной обстановки, взаимодействие с внешними системами и источниками обстановки и имитацию движения трёхмерных объектов.

Теоретико-методологическую основу исследования составили труды отечественных и зарубежных учёных, занимающихся теоретическими и практическими вопросами проектирования и разработки 3D ГИС. При решении поставленных в работе задач использовались методы системного анализа и математического моделирования, проектирования и разработки информационных систем, а также методы программирования.

Научная новизна:

- 1) разработана двухкомпонентная модель для проектирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки с использованием свободно распространяемых ресурсов (библиотек), включающая функциональную модель формирования покрытий заданной функциональности 3D ГИС на основе матрицы соответствия доступных для использования функций и реализующих их библиотек, и геометрическую модель – в виде круговой диаграммы для оценки затрат на его разработку;
- 2) разработан комплекс моделей, диаграмм, которые формируют базу для создания средства проектирования 3D ГИС отображения ситуационных обстановок, который в отличие от известных позволяет снизить требования к уровню подготовки проектировщика и получать достаточно эффективные проектные решения;
- 3) разработан алгоритм проектирования 3D ГИС на базе свободно-распространяемых ресурсов и собственных разработок с использованием функциональной и геометрической моделей, обеспечивающих формирование функциональных покрытий, их оценку и выбор среди них оптимального покрытия с последующей его программной реализацией;
- 4) разработана модель и программная реализация специализированного средства проектирования 3D ГИС, позволяющего использовать современные информационные технологии в виде свободно-распространяемых ресурсов: библиотек, текстур, моделей высот и глубин, 3D-моделей объектов, а также

формировать готовые проектные решения, отвечающие требованиям на разработку 3D ГИС и делать их оценку качества для последующей реализации;

- 5) создана методика и система 3D-моделирования проектных решений, которая позволяет оценивать адекватность полученных проектных решений исходным требованиям на создание 3D ГИС и возможность коррекции для их улучшения.

Практические результаты работы получены автором при выполнении проектов по заказам научно-производственного объединения, и инициативных работ Ульяновского государственного университета и Минобразования и науки РФ.

Теоретическая и практическая значимость работы. Основные результаты диссертационного исследования представляют ценность при проектировании и создании 3D ГИС в областях применения, связанных с необходимостью отображения ситуационной обстановки на основе предложенных в диссертационной работе методик, алгоритмов, средств автоматизации проектирования и моделирования.

Апробация работы и использование результатов.

Результаты работы использовались:

- при программной реализации комплекса 3D-визуализации морской, наземной и воздушной обстановок для ФНПЦ АО «НПО «МАРС»;
- при создании системы 3D моделирования проектных решений при выполнении государственного задания Министерства образования и науки РФ №2.1816.2017/ПЧ по теме «Исследование и разработка интегрированной автоматизированной системы управления производственно-технологическим планированием авиастроительного предприятия на базе цифровых технологий».
- при создании виртуальной кафедры факультета образовательной организации (вуза).

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) функционально-ресурсная двухкомпонентная модель проектирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки с использованием свободно распространяемых ресурсов (библиотек);
- 2) базы моделей, диаграмм и алгоритмов для обеспечения выполнения требований функционирования задаваемой 3D ГИС;
- 3) CASE-средство генерации проектных решений для 3D ГИС отображения морской, наземной и воздушной ситуационных обстановок;
- 4) система 3D-моделирования и визуальной оценки проектных решений, генерируемых в CASE-средстве для создания 3D ГИС;
- 5) методика проведения 3D-моделирования проектных решений.

Публикации. По теме исследования опубликовано 10 работ, отражающих основные положения исследования, в том числе 4 публикации в журналах из Перечня ВАК РФ.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и трёх приложений. Общий объём диссертации составляет 225 страниц, основной текст изложен на 175 страницах, включая 87 рисунков. Библиография включает 128 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, его научная новизна, основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу и методам создания современных геоинформационных систем, выявлены основные недостатки при их разработке.

В §1.1 проведён анализ и классификация 2D ГИС и 3D ГИС по различным признакам, отмечены проблемы их разработки и функционирования, такие как: сложность отображения и динамики перемещения 3D-объектов, принятия решений по текущей обстановке на местности с учётом рельефа, проблема расширения функциональности геоинформационной системы и взаимодействия с узкоспециализированными форматами геоданных.

В §1.2 представлен анализ пространственных данных, используемых в современных геоинформационных системах. Выделены основные составляющие пространственных данных, такие как: метрическая и семантическая информация. На основе пространственных данных построена цифровая модель 3D ГИС, которая отображает данные о рельефе, карту местности, библиотеку 3D-моделей объектов, векторные и растровые данные.

В §1.3 проведён анализ методов создания 2D и 3D ГИС и выделены следующие: разработка универсальной ГИС с подключаемыми внешними модулями; разработка клиент-серверной ГИС; разработка ГИС «с нуля» без использования существующих наработок; разработка ГИС с использованием готовых свободно распространяемых ресурсов сети Интернет. Выявлены основные достоинства и недостатки указанных методов разработки ГИС.

Согласно поставленной цели выделена предметная область, внутри которой сформулированы основные требования к разрабатываемым 3D ГИС: работа в режимах, приближённых к реальному времени; возможность отображения различных ситуационных обстановок и объектов, участвующих в них, 3D-визуализации местности, рельефа и трёхмерных объектов, работа с источниками обстановки; взаимодействие с внешними системами, имитация движения объектов.

Ограничения, которые накладывает предметная область: количество объектов обстановки конечно; типы объектов отображения: морские, наземные, воздушные объекты, векторные и растровые карты, матрицы высот и глубин; отображение трёхмерной обстановки с точностью, достаточной для однозначного определения типа объекта, его траектории движения и принятия решения оператором 3D ГИС.

Проведенный анализ позволил сформулировать задачи по автоматизации проектирования и моделированию проектных решений 3D ГИС, которые позволяют достичь поставленной в диссертации цели.

Глава 2 посвящена проектированию 3D ГИС отображения ситуационной обстановки с использованием готовых свободно-распространяемых ресурсов и собственных разработок.

В §2.1 разработана двухкомпонентная модель (M) проектирования 3D ГИС, включающая функциональную (Φ) и геометрическую (G) модели. Первая модель используется для формирования покрытий заданной функциональности 3D ГИС и содержит матрицу соответствия доступных для использования функций и реализующих их библиотек, а вторая – для оценки затрат на разработку 3D ГИС в виде круговой диаграммы:

$$M = \Phi \cup G. \quad (1)$$

К геометрической модели относятся: совокупность форм $\{h\}$, метрические характеристики $\{g\}$, которые определяют размеры форм, параметры $\{r\}$, задающие местоположение форм в соответствующем геометрическом пространстве:

$$G = (\{h\}, \{g\}, \{r\}). \quad (2)$$

Функциональная модель представляет собой множество функций, доступных для реализации (F), множество библиотек (L), которые частично покрывают эти функции, и матрицу их соответствия (C):

$$\Phi = (F, L, C). \quad (3)$$

Построение 3D ГИС представляет собой разработку отдельных или связанных между собой подсистем, реализующих функции, которые образуют функциональное пространство 3D ГИС (в дальнейшем - функциональность). В работе под понятием функциональности 3D ГИС понимается её способность выполнять набор функций, удовлетворяющих заданным потребностям пользователей, а под покрытием функциональности - подбор решений с возможной их модернизацией.

Для получения функционального покрытия заданной функциональности 3D ГИС используется следующий подход.

1. Строится исходная бинарная матрица (C) размером $n * m$, где m – количество наименований свободно-распространяемых библиотек, которые могут реализовывать функции 3D ГИС для разных областей применения, а n – наименования функций, которые частично реализуются этими библиотеками.

$$C = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & \dots & f_n \\ \begin{matrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_m \end{matrix} & \begin{matrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,n} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & c_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m,1} & c_{m,2} & \dots & c_{m,n} \end{matrix} \end{matrix}$$

В матрице C строки представляют собой множество библиотек $L = \{l_1, \dots, l_m\}$, а столбцы – множество функций $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ заданной области применения. В ячейке $c_{i,j}$ матрицы C соответствия библиотеки l_i и функции f_j содержится единица, если библиотека l_i реализует функцию f_j , в противном случае - ноль.

2. Формируется бинарный вектор $\bar{f} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, элементами которого являются функции, доступные для реализации. В этом векторе единицами помечаются функции, которые входят в список функций проектируемой 3D ГИС, в противном случае - нулём.
3. Умножение бинарной матрицы C на бинарный вектор $\bar{f}$ даёт в результате бинарную матрицу D , в которой столбцы, в строках которых имеются единицы, служат указанием на библиотеки, используемые при проектировании 3D ГИС. Столбцы, во всех строках которых содержатся нули, не входят в список реализуемых функций и поэтому из дальнейшего рассмотрения исключаются.

Задача поиска библиотек, реализующих заданную функциональность, сводится к нахождению кратчайшего покрытия булевой матрицы D , то есть нахождения такой минимальной совокупности строк матрицы, которая содержала бы не менее одной единицы в каждом столбце матрицы.

Для нахождения всех покрытий бинарной матрицы D используется функция Патрика минимизации булевых матриц, которая обеспечивает получение полного списка покрытий заданной матрицы и представляет собой КНФ, состоящую из элементарных дизъюнкций по всем столбцам матрицы.

Количество функциональных покрытий с повторяющимися комбинациями библиотек определяется как:

$$N_{\text{покр}} = \prod_{i=1}^n (f_i * \sum_{j=1}^m d_{i,j}) = \prod_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{i,j}, \quad (4)$$

где n – количество функций из заданной функциональности, m – количество библиотек, их покрывающих.

В связи с тем, что для оценки полученных функциональных покрытий имеют значение только неповторяющиеся комбинации библиотек, то для расчёта их количества используется формула:

$$N_{\text{пкр.б.пв}} = \left[\sum_{i=1}^m l_i * (K_{l_i} - K_{\text{повт.}l_i} - K_{\text{нв.}l_i}) \right]^n, \quad (5)$$

где K_{l_i} – число функций в i -й библиотеке; $K_{\text{повт.}l_i}$ – количество функций в i -й библиотеке, которые повторяются в других библиотеках, $K_{\text{нв.}l_i}$ – количество функций в i -й библиотеке, которые не присутствуют в заданной функциональности.

На основе полученных функциональных покрытий формируется геометрическая модель – круговая диаграмма, представляющая собой круг с дискретизацией n -секторами одинакового размера, число которых равно $\frac{2*\pi}{n}$, где n – количество функций, требуемых для покрытия заданной функциональности проектируемой 3D ГИС (Рисунок 1).

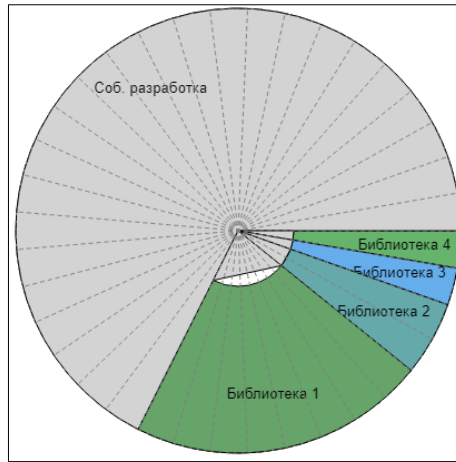


Рисунок 1. Геометрическая модель проектирования 3D ГИС

Сложность создания 3D ГИС отображения ситуационной обстановки характеризуется количеством затрат (Z_{API}) на разработку средств подключения и взаимодействия библиотек, выражаемых площадями треугольников соответствующих им секторов круга меньшего радиуса, и затрат ($Z_{\text{соб.раз.}}$) на собственные разработки непокрытых заданных функций:

$$Z = Z_{API} + Z_{\text{соб.раз.}} \quad (6)$$

Для выбора лучшей библиотеки среди нескольких, покрывающих одинаковые функции, предложен коэффициент затрат на разработку средств подключения и взаимодействия библиотеки с 3D ГИС.

Получена зависимость коэффициента затрат на подключение библиотеки от количества функций, которые она покрывает, вычисляемая как отношение площади треугольника затрат библиотеки (S_2), покрывающей n -функций, к сумме площадей треугольников (S_1) затрат на подключение каждой из этих функций отдельно:

$$K(n) = \frac{S_2}{n*S_1} = \frac{\sin(n*\varphi)}{n*\sin(\varphi)}, \quad (7)$$

где n – количество функций, покрываемых библиотекой, φ – угол единичного сектора.

На графике (Рисунок 2) представлена зависимость коэффициента затрат на создание средств подключения и взаимодействия библиотеки с 3D ГИС от количества функций, покрываемых этой библиотекой. На основе расчётов выявлено, что с увеличением количества функций, покрываемых библиотекой, уменьшается коэффициент затрат на её подключение.

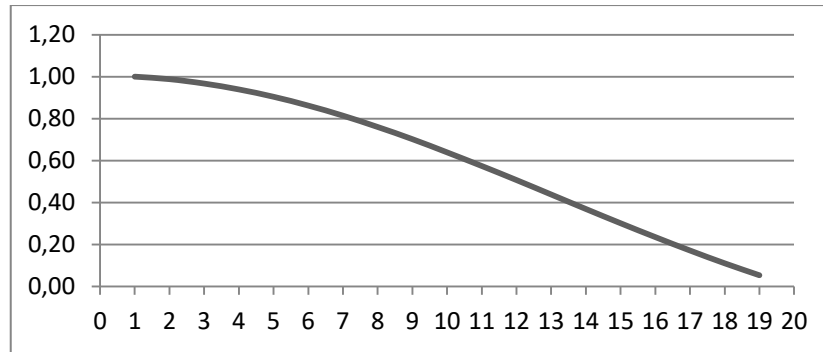


Рисунок 2. Зависимость коэффициента затрат на разработку средств подключения и взаимодействия библиотеки с 3D ГИС от количества покрываемых функций

Рабочий диапазон коэффициента затрат: $[1, \frac{N}{2})$, где N – суммарное количество функций из заданной функциональности. В случае, если библиотека покрывает одну функцию, то коэффициент затрат на разработку средств подключения и взаимодействия библиотеки с 3D ГИС равен 1. При покрытии библиотекой $\frac{N}{2}$ функций коэффициент затрат стремится к нулю.

Сложность собственных разработок непокрытых функций и сложность разработки средств по подключению и взаимодействию библиотек с 3D ГИС имеют важное значение в процессе ее проектирования.

Реализация каждой функции из библиотеки или собственной разработки характеризуется в работе как сложность разработки. Предлагается оценка сложности функций по количеству операторов, реализующих её, как наиболее удобная для практических применений. В случае, если i -ая функция покрывается какой-либо библиотекой, то сложность функции (Z_i) определяется количеством операторов в составе функции этой библиотеки и тогда сложность библиотеки вычисляется как сумма сложностей функций, которые она покрывает:

$$Z' = \sum_{i=1}^k Z_i, \quad (8)$$

где k – количество функций, покрываемых библиотекой.

Установлена зависимость сложности функций, реализуемых библиотеками, и суммарного угла, занимаемого ими на круговой диаграмме, которая позволяет вычислить сложность программной реализации функции единичного угла:

$$Z_{\text{ед.}} = \frac{\alpha \cdot \sum_{i=1}^n Z_i}{360^\circ} \text{ операторов}, \quad (9)$$

где α – угол сектора, занимаемого библиотеками, n – количество функций, покрываемых библиотеками.

На основе формулы 9 определяется сложность собственных разработок функций, не покрываемых библиотеками, как произведение угла (β) сектора, который они занимают, на значение сложности функции единичного угла ($Z_{\text{ед.}}$):

$$Z_{\text{соб.раз.}} = \beta \cdot Z_{\text{ед.}} \text{ операторов}. \quad (10)$$

С использованием формул 9 и 10 появляется возможность приближённого оценивания сложности программной реализации каждого функционального покрытия проектируемой 3D ГИС с использованием как свободно распространяемых библиотек, так и собственных разработок.

Покрывтия, полученные в ходе функционального моделирования, визуализируются в виде пространства состояний – дерева библиотек с возможностью поиска по нему опти-

мального покрытия по заданному критерию. Такими критериями являются: минимальное количество библиотек в покрытии и минимальный коэффициент затрат на разработку средств по подключению и взаимодействию библиотек с 3D ГИС.

Длина ветви дерева библиотек (без начальной вершины) соответствует количеству библиотек в покрытии, а количество «листьев» в дереве библиотек соответствует количеству допустимых покрытий для текущего набора функций.

В дереве библиотек встречаются библиотеки с различным количеством покрываемых функций. Их выбор влияет на длину пути в дереве и на количество собственных затрат.

Разработаны два варианта построения дерева библиотек в зависимости от критериев поиска по нему.

I. Первый вариант: построение дерева поиска покрытий с минимальным количеством библиотек. Поиск в дереве идёт сверху вниз, отталкиваясь от корневого узла, а листьями является множество библиотек, покрывающих заданную функциональность.

1) Обозначается корневая вершина.

2) Преобразовывается матрица D , исключаются из неё все столбцы, описывающие функции, не входящие в вектор $\bar{f}$.

3) Проводится поиск множества функций $\{f_i\}$, которые реализованы меньшим количеством библиотек, т.е. столбцы с минимальной суммой элементов в преобразованной матрице D :

$$\sum_j^m c_{i,j} \rightarrow \min. \quad (11)$$

4) Для каждой функции из полученного множества формируется множество библиотек $\{l_j\}$, реализующих найденные функции в пункте 3.

5) Для каждой из них строится вершина в дереве библиотек и преобразовывается матрица D , из которой исключаются все столбцы, описывающие функции, входящие в библиотеку l_j .

6) Рекурсивно осуществляется переход на шаг 3 для каждой из выбранных библиотек, если в матрице D остались столбцы, в противном случае, строится конечная вершина дерева.

II. Второй вариант: построение дерева библиотек, позволяющего оценивать значения коэффициента затрат на разработку средств по подключению и взаимодействию библиотек с 3D ГИС. В основу алгоритма заложен итерационно-рекурсивный процесс, в котором рекурсия используется для поиска минимального коэффициента затрат в матрице затрат W , а итерация обеспечивает пошаговый подбор библиотеки с минимальными затратами и последующее уменьшение размеров матрицы. Поиск оптимального пути в этом дереве начинается от корня, листьями являются библиотеки с характеризующими их коэффициентами собственных затрат на разработку средств подключения и взаимодействия библиотек с 3D ГИС.

1) Формируется матрица (W) коэффициентов затрат, в которой столбцами обозначаются функции из заданной функциональности, а строками – библиотеки, их покрывающие. На пересечении строки и столбца матрицы записывается 0, если библиотека не покрывает данную функцию, в противном случае – коэффициент затрат (K_j) на разработку средств подключения и взаимодействия j -й библиотеки с 3D ГИС.

Матрица затрат выглядит следующим образом:

$$W = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & \dots & f_n \\ \begin{matrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_m \end{matrix} & \begin{matrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,n} \\ w_{2,1} & w_{2,n} & \dots & w_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{m,1} & w_{m,2} & \dots & w_{m,n} \end{matrix} \end{matrix}$$

где $w_{i,j} = K_j$, если библиотека l_j покрывает функцию f_i , в противном случае – 0. Задаётся корневая вершина дерева.

- 2) Выполняется поиск ячейки с минимальным коэффициентом затрат на разработку средств подключения и взаимодействия библиотеки с 3D ГИС.
- 3) К корневой вершине добавляется библиотека, соответствующая выбранной на шаге 2 ячейке матрицы W . Если найдено несколько ячеек с одинаковым коэффициентом затрат, то записываются все библиотеки, им соответствующие.
- 4) Рекурсивно для каждой выбранной библиотеки выполняется удаление из матрицы W строки, соответствующей этой библиотеке, и всех столбцов, которые она покрывает, библиотека указывается в качестве корневой вершины текущего поддерева, и, если матрица W непустая, повторяются шаги 2-4.

Использование второго дерева актуально при создании 3D ГИС с ограниченными затратами на разработку, которые контролируются с помощью геометрической модели по площади секторов, отражающих собственные разработки и связанных с затратами на программную реализацию.

При подборе библиотек может оказаться, что две библиотеки являются эквивалентными, т.е. покрывают одни и те же функции. Для выбора одной из них предлагается делать оценку по дополнительным критериям: однородность языков программирования у библиотек; платформа, на которой библиотеки функционируют; системные и аппаратные требования библиотек; критерий избыточности кода покрытия библиотек (минимум мощности разности множеств функций из библиотек покрытия и требуемых функций).

Схема взаимодействия функциональной и геометрической моделей в процессе получения проектного решения отображается на рисунке 3, которая показывает, что входными данными в функциональную модель являются функциональность 3D ГИС и база библиотек, которые полностью или частично её покрывают.

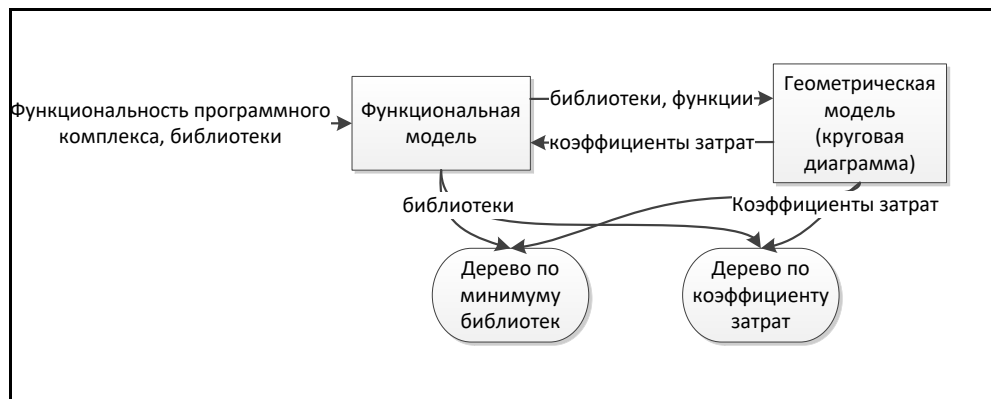


Рисунок 3. Схема взаимодействия функциональной и геометрической моделей

Между функциональной и геометрической моделями организовано двухстороннее взаимодействие в котором из функциональной модели в геометрическую передаётся ин-

формация об используемых библиотеках и функциях в виде матрицы соответствия D , а в обратную сторону – вычисленные с помощью геометрической модели коэффициенты затрат на разработку средств по подключению и взаимодействию библиотек с 3D ГИС. С использованием функциональной и геометрической моделей имеется возможность построения дерева библиотек двух вариантов: по минимуму библиотек и по минимуму коэффициентов затрат на подключение библиотек.

Процесс формирования дерева библиотек с помощью функциональной и геометрической моделей по первому алгоритму представлен на рисунке 4. Построение дерева начинается с корня с обращением к матрице D , и последовательном обходе узлов. На круговой диаграмме, расположенной слева, проход каждого узла отображается добавлением сектора с указанием имени библиотеки и количества реализуемых функций. В центре круга выделены площади треугольников, охватывающих сектора соответствующих библиотек и обозначающих необходимость дополнительных затрат (K) по подключению и взаимодействию библиотек с 3D ГИС.

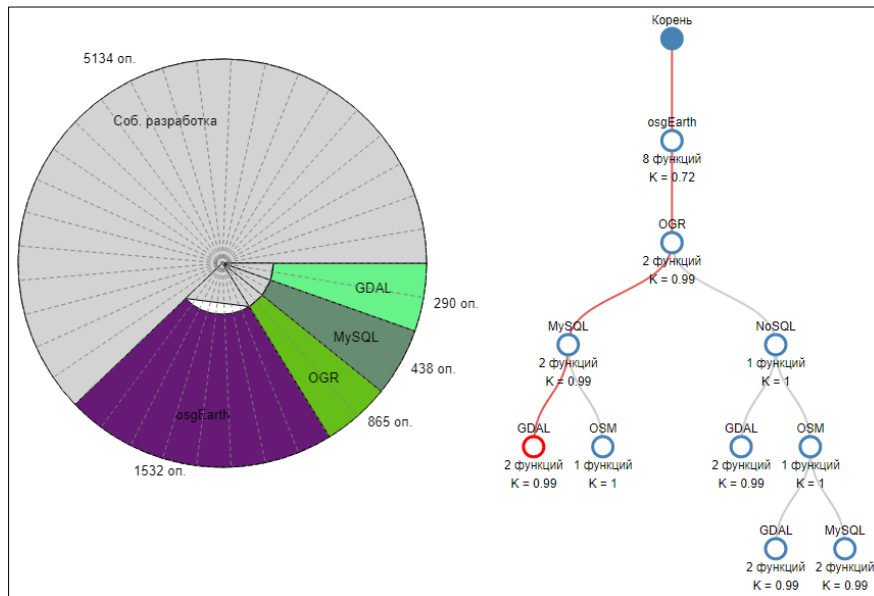


Рисунок 4. Дерево библиотек и круговая диаграмма по первому алгоритму

На основе функциональных покрытий и дерева библиотек, а также особенностей функционирования 3D ГИС (взаимодействия с пространственными данными; обработки динамической модели местности; преобразования трёхмерных растровых изображений в векторные графические модели; обработки картографической информации с учётом рельефа; построения и анализа 3D-моделей объектов или местности и др.) разработана структурно-функциональная схема системы автоматизации проектирования 3D ГИС на основе CASE-средства (Рисунок 5).

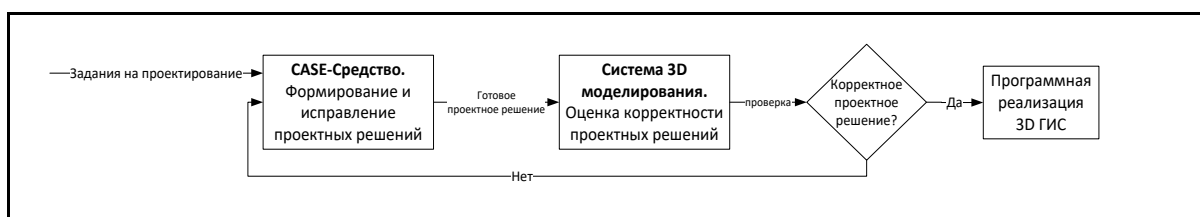


Рисунок 5. Структурно-функциональная схема системы автоматизации проектирования 3D ГИС на основе CASE-средства

Предложенная структурно-функциональная схема системы автоматизации проектирования 3D ГИС содержит 5 укрупнённых этапов:

1. *Предварительный этап*, включающий формирование заданий на проектируемую 3D ГИС, создание базы инструментов реализации, базы алгоритмов проектирования и функционирования 3D ГИС, базы данных описания обстановки. Этап заканчивается определением полной функциональности проектируемой системы и формированием инструментария в виде набора удовлетворяющих этой функциональности инструментов разработки.
2. *Этап проектирования*. На этом этапе используется CASE-средство проектирования 3D ГИС, которое на основе введенных проектировщиком требований к системе формирует функциональные покрытия с возможностью их оценки и выбора в дереве библиотек. Дополнительно для каждого функционального покрытия генерируются проектные решения, включающие модели и диаграммы 3D ГИС, инструменты реализации и исходные коды файлов заголовков.
3. *Этап моделирования* проектных решений. На этом этапе проводится визуальная оценка проектного решения и принимается решение о его программной реализации. В случае неудовлетворения требованиям, заданным проектировщиком на первом этапе проектирования, разработанное проектное решение дорабатывается с помощью CASE-средства, изменяется и вновь проходит визуальную оценку. Процесс носит циклический характер и заканчивается после устранения замеченных недостатков.
4. *Этап программной реализации* проектного решения, на котором разрабатываются следующие функции: построение трёхмерной модели поверхности Земли в каркасном или текстурированном виде, масштабирование трёхмерной модели с автоматической генерализацией объектов, навигация по трёхмерной сцене в режиме реального времени, выбор режима перемещения по трёхмерной модели, отображение векторных и растровых карт, поиск и выделение объектов по различным критериям, фиксация участка местности в заданном масштабе, отображение пути по рельефу местности и перемещение виртуальной камеры по нему, отображение классификатора 3D-моделей.
5. *Этап проведения моделирования и оценки качества* выполняемых требований согласно поставленной проектировщиком задаче. На этом этапе осуществляется: компоновка программных средств, выбор среды моделирования, подготовка тестовых данных, запуск и пошаговый контроль системы, загрузка тестовых данных (указание координат района Земли, загрузка векторных и растровых данных, загрузка 3D-объектов), навигация по 3D-глобусу (масштабирование местности, переход по координатам), управление слоями и объектами обстановки, поиск и выделение объектов, взаимодействие 3D ГИС с внешними системами, моделирование движения 3D-объектов.

Разработана структурная схема CASE-средства для проектирования 3D ГИС (Рисунок 6). CASE-средство имеет трехуровневое представление.

Первый уровень – уровень хранения данных – содержит базу данных описания обстановки и базу данных инструментов реализации. Эти базы строятся на основе двух реляционных моделей представления данных: модели обстановки и модели описания инструментов, которые используются для описания функций и объектов проектируемой 3D ГИС.

На *втором уровне* – уровне бизнес-логики – находятся функциональные модули, позволяющие на основе пересечения множеств функций обобщенной функциональной

модели 3D ГИС и функций, описанных проектировщиком, определять доступные для данного проекта библиотеки и на основе описания библиотек на уровне хранения в модуле проектирования формировать проектные решения.

На *третьем уровне* – уровне представления – находятся интерфейс разработчика и модуль визуализации. На основании полученных оценок пользователь может выбрать лучшее для него проектное решение и просмотреть его в виде диаграмм в модуле визуализации, а также на базе диаграммы классов получить заголовочные файлы с помощью модуля генерации кода.

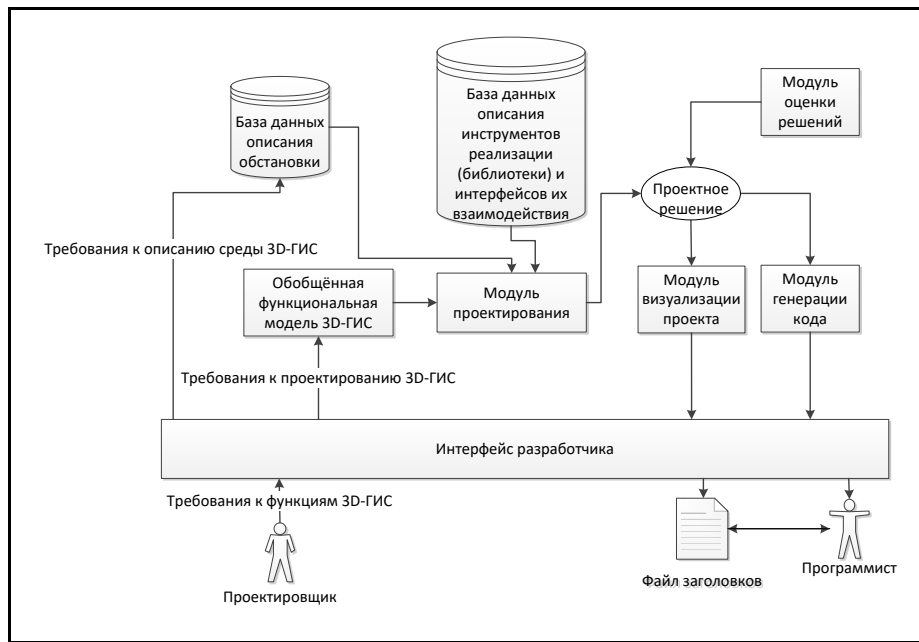


Рисунок 6. Структурная схема CASE-средства проектирования 3D ГИС

Разработана программная реализация CASE-средства, которая осуществляет поддержку проектировщику и разработчику на этапах анализа и проектирования 3D ГИС, а файлы заголовков являются результатом проектирования, используемым на этапе реализации 3D ГИС.

На этапе проектирования 3D ГИС проектировщику необходимо указать критерии, на основе которых CASE-средство формирует проектные решения. К таким критериям относятся: режимы отображения обстановки, функции 3D ГИС, объекты обстановки, язык программирования, поддерживаемые платформы, генерируемые модели 3D ГИС.

На основе двухкомпонентной модели проектирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки после введения всех необходимых данных CASE-средство генерирует перечень проектных решений, удовлетворяющих заданным критериям и готовых к реализации.

Проектное решение включает в себя: функциональную, структурную, брокерную, композиционную модели, модель описания обстановки, модель проекций библиотек, модель описания инструментов реализации; диаграмму классов, ERD-диаграмму описания обстановки, ERD-диаграмму библиотек; исходные коды файлов заголовков; базу библиотек; базу текстур; базу высот и глубин; базу 3D-моделей объектов.

Для упрощения проектирования 3D ГИС с использованием CASE-средства разработан мастер генерации проектных решений, помогающий пользователю CASE-средства быстро и наглядно осуществлять выбор всех необходимых требований к проектированию 3D ГИС и формировать на их основе проектные решения 3D ГИС. Мастер генерации проектных решений формирует следующие процедуры: выбор типа 3D ГИС; выбор режимов

отображения; выбор функций 3D ГИС; выбор объектов обстановки; выбор языка программирования; выбор платформ; выбор генерируемых моделей 3D ГИС.

Глава 3 посвящена разработке моделей и диаграмм проектных решений 3D ГИС и разработке алгоритмов проектирования 3D ГИС, а именно, создан комплекс моделей, диаграмм 3D ГИС, алгоритмов, с помощью которых формируется база для создания CASE-средства проектирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки и генерируются проектные решения и исходные коды файлов заголовков для последующей разработки на их основе 3D ГИС.

CASE-средство проектирования 3D ГИС базируется на использовании следующих основных моделей: модели описания обстановки, включающей в себя местность, модели текстур и рельефа, динамические и статические объекты, которые взаимодействуют между собой; обобщённой функциональной модели 3D ГИС, с помощью которой отображаются процессы и функции, применяемые как для проектирования, так и для реализации 3D ГИС в реальных условиях; модели описания свободно распространяемых библиотек, которая отображает базу библиотек, используемых при проектировании 3D ГИС, а также их особенности и способы взаимодействия; модели проекций библиотек, которая представляет собой отображение функциональных возможностей библиотек на компоненты 3D ГИС; брокерной модели, которая отображает механизмы взаимодействия библиотек и компонентов 3D ГИС между собой, а также необходимость разработки специальных адаптеров, обеспечивающих это взаимодействие; композиционной модели, которая отображает варианты подключения библиотек в компонентах 3D ГИС и функции, которые они выполняют.

На основе двухкомпонентной функционально-ресурсной модели, а также формируемых CASE-средством моделей и диаграмм был построен его общий алгоритм функционирования, реализующий следующие функции: работу с базой данных описания обстановки, работу с базой данных описания инструментов реализации, управление проектом, конфигурационное управление, тестирование, создание документации, построение моделей 3D ГИС и генерацию исходных кодов файлов заголовков. Каждая из этих функций описывается соответствующим ей алгоритмом проектирования, который является частью общего алгоритма функционирования CASE-средства.

При инициализации CASE-средства отображается панель интерфейса, где сосредоточены основные элементы управления: выбор функций, объектов обстановки, языка программирования и платформы разрабатываемой 3D ГИС, а также генерируемых моделей, на основе которых будет производиться программная реализация. После ввода всех необходимых данных становится доступной генерация проектных решений.

С целью просмотра сгенерированных проектных решений введена дополнительная функция «Проектные решения 3D ГИС», которые представлены на рисунке 7. В левой части панели отображаются все полученные проектные решения с детальной информацией, а также модели и диаграммы, обеспечивающие их программную реализацию и возможность просмотра функционального и геометрического покрытий проектируемой 3D ГИС и дерева библиотек.

Анализ проектирования подобных CASE-средств показал, что при разработке наиболее удовлетворяет требованиям язык Python, так как обладает такими важными преимуществами, как: простота в использовании, понятный синтаксис, возможность объектно-ориентированного программирования (ООП), большое количество дополнительных библиотек.

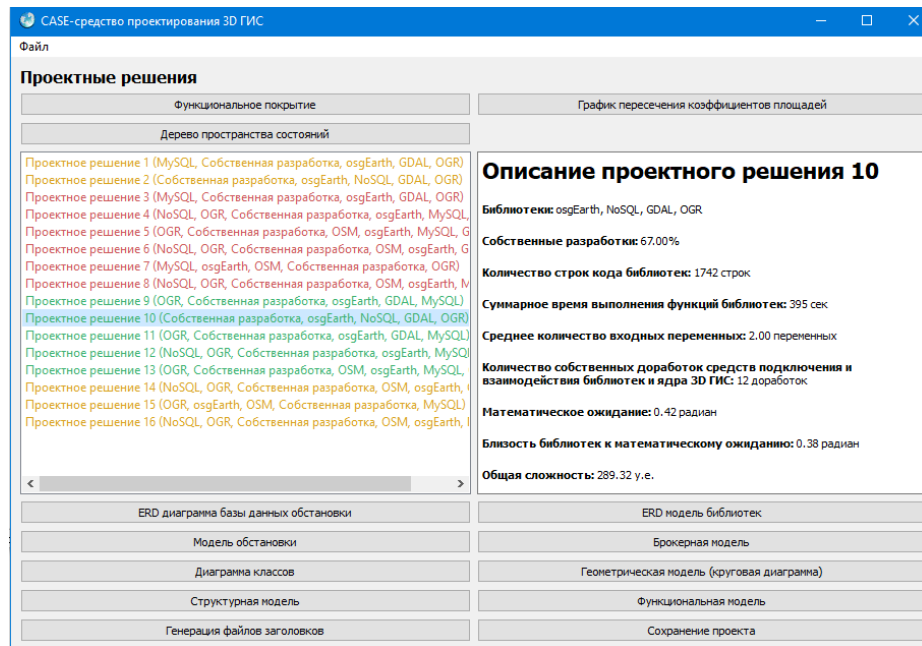


Рисунок 7. Проектные решения 3D ГИС

В четвёртой главе решается задача разработки алгоритмов функционирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки, реализующих многорежимный приём и обработку данных и выполняющих отображение морской, наземной и воздушной ситуационных обстановок с заданной точностью, и задача создания на их основе системы 3D-моделирования и оценки проектных решений, обеспечивающих визуализацию трёхмерной обстановки, взаимодействие с внешними системами и источниками обстановки и имитацию движения трёхмерных объектов.

Разработанная система 3D-моделирования проектных решений обладает функциональной полнотой, т.е. способностью выполнять большинство функций типовых 3D ГИС и работать с пространственными данными и 3D-моделями объектов и ситуаций.

Для обеспечения 3D-моделирования проектных решений предложены основные режимы отображения обстановки, а также входящие в них трёхмерные объекты, текстуры, матрицы высот и глубин, позволяющие отображать реальную обстановку и проводить визуальную оценку проектных решений. Такими режимами являются: морской режим отображения обстановки, наземный режим отображения обстановки, воздушный режим отображения обстановки, смешанный режим отображения обстановки.

Создана база алгоритмов функционирования, реализующих функции, широко используемые в современных 3D ГИС: алгоритм идентификации ситуации; алгоритм распознавания объекта; алгоритм привязки растрового изображения по координатам; алгоритм рисования фигуры на карте; алгоритм полёта камеры; алгоритм обмена информацией по UDP-порту; алгоритм обмена информацией с внешними системами; алгоритм фильтрации слоёв информации; алгоритм построения модели обстановки.

Для их взаимодействия между собой и с другими алгоритмами, расширяющими основную функциональность, был разработан общий алгоритм функционирования 3D ГИС, который отображает последовательность выполнения действий 3D ГИС от запуска и до завершения.

Перечисленные выше алгоритмы образуют «скелетную» модель и являются необходимой базой для обеспечения функционирования любого режима 3D ГИС (Рисунок 8).

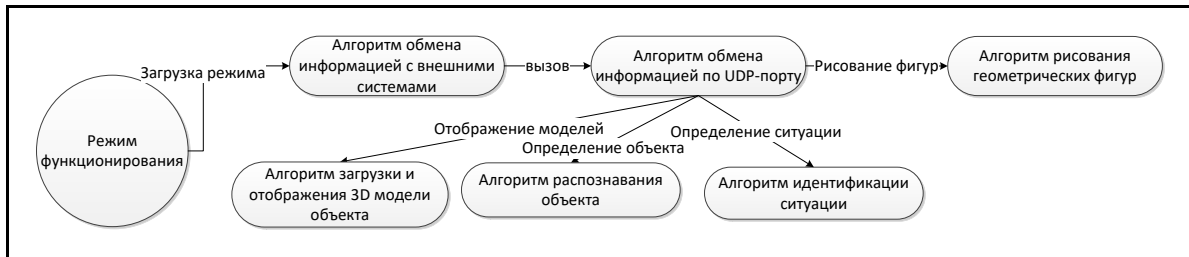


Рисунок 8. «Скелетная» модель алгоритмов функционирования 3D ГИС

На основе «скелетной» модели возможно моделирование как уже указанных ранее режимов, так и создание новых. Алгоритмическая база взаимодействует с любым режимом при помощи специального интерфейса API, который обеспечивает передачу входных и выходных данных алгоритмов между собой и с готовыми библиотеками.

Для задания режима отображения обстановки 3D ГИС, изменения объектов, рельефа и текстур местности оператору предложены специальные средства взаимодействия с 3D ГИС. Такие средства могут использовать 4 основных способа ввода данных: ручной ввод; обмен через XML файл; обмен через базу данных; обмен по порту.

Ручной ввод является самым медленным видом обмена информацией в 3D ГИС. Обмен через XML файл обеспечивает хранение всей текущей информации в файле формата XML. Обмен через базу данных даёт возможность одновременного обновления информации от нескольких внешних систем за счёт использования транзакций. Наиболее оперативным способом обмена является прямое взаимодействие между 3D ГИС и внешними системами через порт. В настройках 3D ГИС задается номер порта (UDP или TCP), по которому система ожидает входящие сообщения и при получении следующего автоматически обновляет обстановку.

На базе алгоритмов функционирования 3D ГИС разработана программная реализация системы 3D-моделирования проектных решений, позволяющая производить их визуальную оценку на основе отображаемой обстановки в заданных режимах.

На начальном шаге в системе 3D-моделирования производится выбор одного из четырёх режимов ввода обстановки: через ручной ввод, через XML файл, через базу данных и по порту. Для ручного ввода используется возможность выбора требуемого режима из списка всех доступных режимов.

Следующим шагом является заполнение местности, загрузка карт, рельефа местности, объектов, принимающих участие в ситуации. В системе 3D-моделирования есть возможность использования следующих форматов карт: растровых (GeoTIFF, PNG, JPG, BMP, OpenStreetMap) и векторных (SHAPE, KML, S57, SXF).

После задания всех необходимых составляющих обстановки производится визуальная оценка проектного решения. Для этого в системе 3D-моделирования доступны следующие режимы визуализации: режим отображения динамики движения объектов путём внесения координат, режим облёта камеры, режим переключения отображаемых слоёв обстановки, режим наложения различных типов карт, режим полноэкранного отображения, режим добавления векторных объектов, режим фильтрации объектов, режим слежения за объектом и другие.

Дополнительными возможностями системы 3D-моделирования проектных решений являются: возможность визуализации семантических данных; возможность масштабирования местности; возможность интерактивного искажения; возможность окрашивания объектов.

Предложенных режимов и указанных возможностей системы 3D-моделирования вполне достаточно для того, чтобы проектировщик смог оценить полученное проектное решение с целью его дальнейшей доработки или реализации.

В пятой главе решается задача моделирования разрабатываемых 3D ГИС на основе проектных решений, формируемых CASE-средством для установления соответствия заданным требованиям и условиям их практического применения.

Система 3D-моделирования проектных решений морской, наземной и воздушной обстановки включает в себя компоненты, которые обеспечивают достаточно эффективную визуализацию проектных решений широкой области применения: компонент 3D-визуализации с пользовательским интерфейсом (отображение поверхности Земли в каркасном виде, фильтрация слоёв обстановки, регулирование скорости визуализации, масштабирование, отображение линейных, точечных и площадных объектов, наложение рельефа и текстур на модель местности, управление 3D-моделями объектов, формирование интерфейса пользователя); компонент работы с источниками обстановки (открытие карт векторных и растровых форматов, привязка карт по координатам, отображение трёхмерных моделей объектов, кэширование информации, формирование баз текстур, высот и глубин, объектов); компонент поддержки интерфейсов взаимодействия с внешними системами (автоматизированное нанесение 3D-обстановки от внешних систем, получение информации об обстановке, вывод справки об объекте, добавление, редактирование, удаление слоёв обстановки); компонент имитации движения объектов в 3D-пространстве (задание траекторий и скорости движения объектов, создание, загрузка и сохранение сценариев движения объектов, моделирование динамики перемещения объектов).

На основе представленных выше компонентов системы 3D-моделирования, а также возможностей современных 3D ГИС (ArcGIS, QuantumGIS, GRASS и др.) предложена оценка адекватности проектного решения с использованием критериев принятия решений по трёхмерной обстановке, которая позволяет определить необходимость дальнейшей доработки проектного решения или возможность его программной реализации.

Критерии оценки адекватности проектного решения: скорость отображения новых объектов и изменения существующих (K_1); масштаб объекта (K_2); скорость интерпретации (K_3); группирование объектов (K_4); время идентификации объекта (K_5); время идентификации ситуации (K_6); разрешение моделей объектов (K_7); глубина цвета моделей объектов, текстур (K_8).

Указанные критерии взаимодействуют друг с другом и в итоге влияют на скорость интерпретации обстановки пользователем в целом.

На рисунке 9 представлен граф взаимодействия критериев, который показывает связанность критериев, влияние изменений их значений друг от друга.

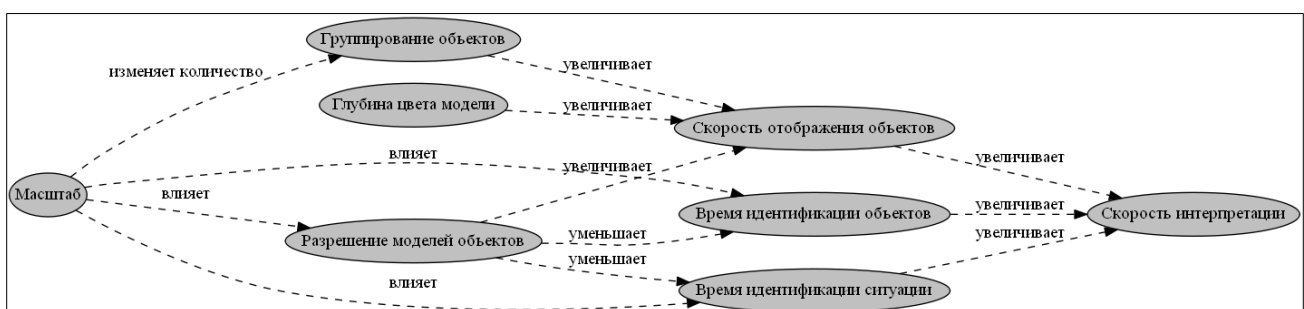


Рисунок 9. Граф взаимодействия критериев для оценки адекватности проектного решения

На основе анализа существующих 3D ГИС (ArcGIS, QuantumGIS, GRASS, ГИС «Панорама»), а также собственных разработок, моделирования и тестирования 3D ГИС отображения морской, наземной и воздушной ситуационных обстановок, для каждого критерия предложены следующие интервалы соответствия: $K_1 = [0; 5]$ с; $K_2 = [0,1; 10]$ раз; $K_3 = [0; 4]$ с; $K_4 = [0; 50]$ пикселей; $K_5 = [0; 3]$ с; $K_6 = [0; 3]$ с; $K_7 = [600 \times 400; 1920 \times 1080]$ пикселей; $K_8 = [8; 32]$ бит.

Алгоритм функционирования блока оценки адекватности проектного решения представлен на рисунке 10.

На первом этапе проводится последовательная проверка вхождения значений каждого критерия в заданный для него интервал соответствия. В случае выхода значения из интервала вычисляется значение несоответствия (Δ), которое записывается в оперативную память.

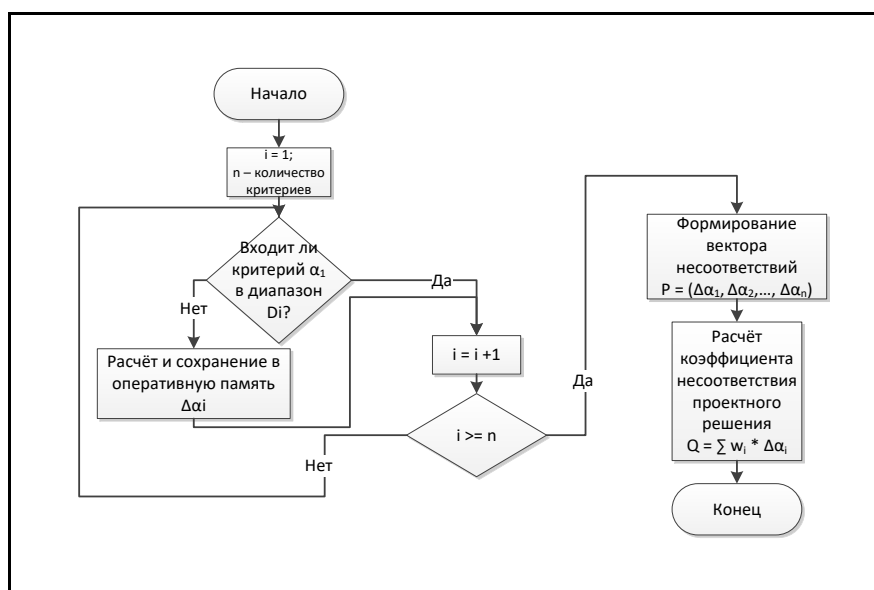


Рисунок 10. Алгоритм функционирования блока оценки адекватности проектного решения

На следующем этапе после проверки всех критериев алгоритм формирует вектор несоответствий из сохранённых в оперативную память значений Δ критериев. На основе полученного вектора вычисляется общий коэффициент несоответствия проектного решения. Если этот коэффициент не входит в заданный заранее экспертами интервал, то проектное решение не прошло проверку и рекомендуется его дальнейшая доработка. Отклонение каждого критерия в векторе несоответствий определяет, в каких именно библиотеках необходимо внести уточнения или полностью их заменить.

После формирования скорректированного проектного решения производится его оценка в системе 3D-моделирования. Если проектное решение снова не удовлетворяет качеству, то возможна повторная его доработка, в противном случае процесс моделирования завершается и можно приступать к программной реализации корректного проектного решения.

На основании заданных интервалов критериев, а также рассчитанных значений критериев рассматриваемого проектного решения построена лепестковая диаграмма критериев оценки адекватности проектного решения (Рисунок 11). Если при построении значений критериев проектного решения его пространство не выходит за границы пространства критериев данной диаграммы, то проектное решение будет считаться адекватным. В противном случае проектное решение рекомендуется модифицировать.

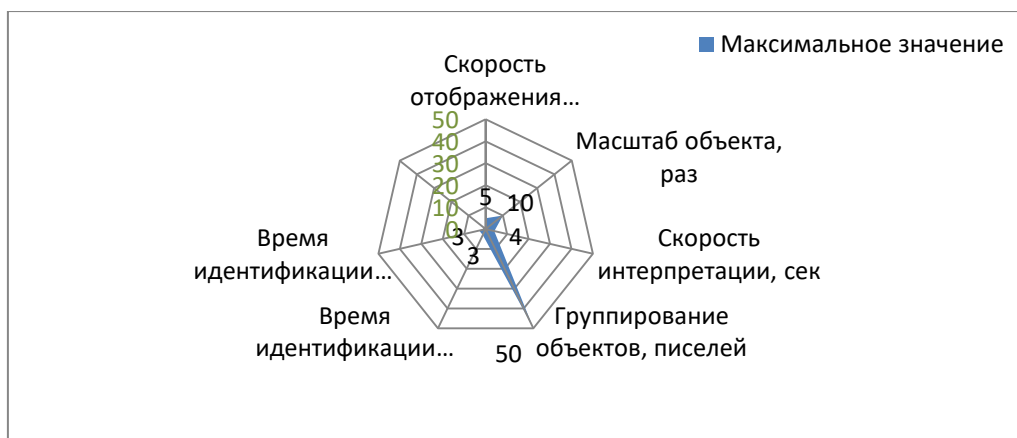


Рисунок 11. Диаграмма отображения пространства критериев адекватного проектного решения

В пятой главе создана методика испытаний системы 3D-моделирования проектных решений по основным функциям, выполняемым системой, таким как: построение трёхмерной модели поверхности Земли, отображение векторных и растровых карт, 3D-моделей объектов, построение рельефа местности, имитация движения объектов, взаимодействие с внешними системами и др.

Предложен модуль управления запуском системы 3D-моделирования проектных решений непосредственно из терминала операционной системы вводом специальной команды запуска (в формате: `gis [-coord <координаты_местности>] [-config <путь_к_файлу_конфигурации>] [-angle <угол_наклона_камеры>]`), в котором имеется возможность задания в параметрах команды географических координат, с которых начинается отображение обстановки, а так же угла наклона камеры к горизонту и набора слоев отображения обстановки.

Инициализация системы 3D-моделирования осуществляет построение трёхмерной модели поверхности Земли в текстурированном или каркасном виде. Интерфейс системы моделирования представляет собой рабочее пространство, на котором отображается трёхмерная модель Земли с наложенными текстурами, рельефом, объектами обстановки, панель управления с перечнем основных команд системы моделирования и главное меню, в котором размещены настройки системы и некоторые дополнительные функции (Рисунок 12).

Масштабирование трёхмерных моделей в подсистеме 3D-визуализации производится с автоматической картографической генерализацией, путем изменения степени детализации объектов в зависимости от расстояния до камеры.

В системе 3D-моделирования проектных решений предусмотрена навигация по трёхмерной сцене в режиме реального времени по всем степеням свободы, которая осуществляется при помощи движения курсора мыши: изменение уровня горизонта, масштабирование в точку нахождения курсора, перемещение по карте.

Для работы с космическими снимками имеется возможность их загрузки в высоком разрешении из базы текстур и трансформирования на всю территорию с учетом рельефа благодаря информации, подгружаемой из базы высот и глубин. База текстур и база высот и глубин могут находиться как на локальной ЭВМ, так и на удаленной.

Система 3D-моделирования позволяет накладывать на поверхность и визуализировать растры GeoTIFF, векторные данные, например, shape-файлы ESRI, OGC-совместимые веб-сервисы (например, WMS), слои ГИС, опубликованные при помощи

MapServer или ESRI ArcGIS Server, а так же карты OpenStreetMap, ArcGIS Online или NASA On Earth.

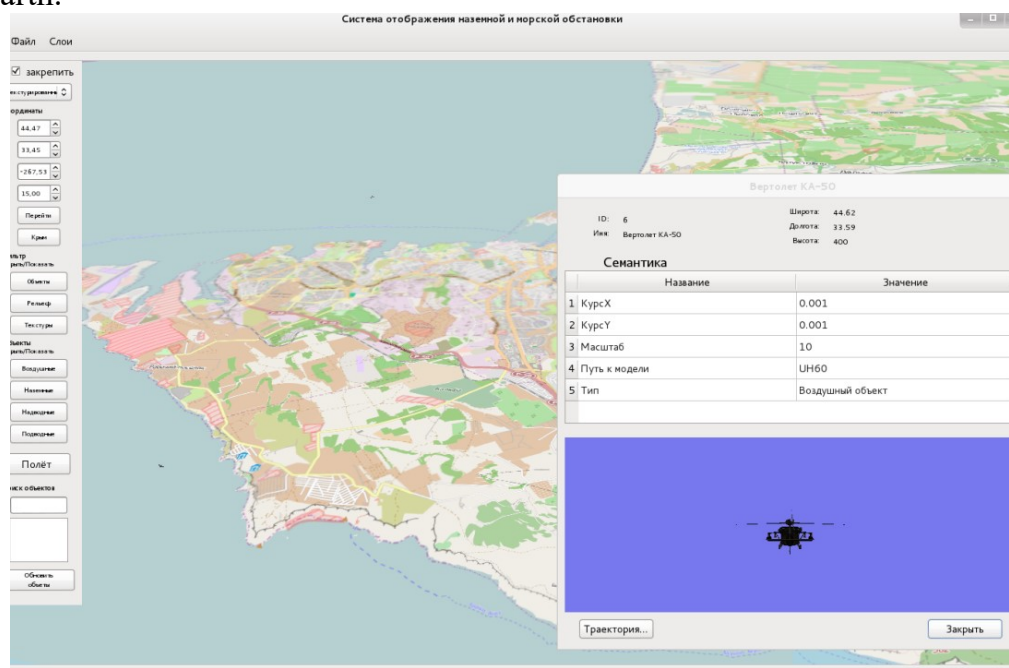


Рисунок 12. Интерфейс системы 3D-моделирования проектных решений

В системе 3D-моделирования проектных решений возможны поиск и выделение объекта, которые осуществляются с помощью поисковой строки, расположенной на панели управления, после чего происходит центрирование камеры на результаты поиска.

В разработанной системе 3D-моделирования предусмотрена фильтрация отображения и управление слоями информации с помощью графических элементов, расположенных на панели управления. Возможность управления всеми параметрами отображения в подсистеме 3D-визуализации реализована посредством программного взаимодействия с библиотекой osgEarth через конфигурационный XML-файл, по UDP-порту или вручную оператором с помощью графического интерфейса пользователя на панели управления. Результаты моделирования можно архивировать для дальнейшего использования и добавления новых объектов.

В этой же главе предложена оценка эффективности проектирования 3D ГИС на основе CASE-средства. Для этого необходимо определять сложность проектирования 3D ГИС с использованием разработанного CASE-средства и сложность в его отсутствии.

Предлагается оценивать сложность 3D ГИС как сумму оценок сложностей каждой из используемых при разработке библиотек и алгоритмов, реализующих недостающую функциональность.

Оценка сложности библиотеки или алгоритма определяется как:

$$S_{\text{библ (алг)}} = \sum_{i=1}^n S_{i \text{ ф.в.}}, \quad (12)$$

где n – количество функциональных выражений библиотеки или алгоритма.

Для оценки эффективности использования готовой библиотеки вместо собственной разработки на основе предложенного алгоритма предлагается формула:

$$S_{\text{эфф.библ}} = S_{\text{алг}} - S_{\text{библ}} + S_{\text{ад}}, \quad (13)$$

где $S_{\text{ад}}$ – сложность создания адаптера для подключения библиотеки к разрабатываемой 3D ГИС.

Сложность адаптера определяется аналогично сложности библиотеки или алгоритма путём декомпозиции до функциональных выражений. Сложность всей 3D ГИС вычисляется следующим образом:

$$S_{\text{ГИС}} = \sum_{i=1}^n S_{i \text{ алг}} + \sum_{j=1}^m S_{j \text{ ад}}, \quad (14)$$

где n – количество собственных алгоритмов, m – количество адаптеров.

Эффективность использования системы автоматизации проектирования с использованием свободно распространяемых библиотек вместо разработки всех компонентов системы «с нуля» определяется как:

$$S_{\text{эфф}} = \sum_{i=1}^k S_{i \text{ алг}} - S_{\text{ГИС}}, \quad (15)$$

где $k = n + m$ – общее число алгоритмов и библиотек, используемых в 3D ГИС.

При декомпозиции алгоритмов и библиотек на функциональные выражения целесообразно использовать специализированные программы для статистического анализа исходного кода (например: PVS-Studio, FindBugs, PVS-Studio, Pychecker).

С использованием предложенного в диссертации средства проектирования 3D ГИС создан «Комплекс 3D-визуализации морской, наземной и воздушной обстановок» для ФНПЦ АО «НПО «МАРС». Эффективность разработки этого комплекса на основе предложенного средства проектирования с использованием свободно распространяемых библиотек – 11 770 операторов, что составляет 34% от сложности разработки 3D ГИС «с нуля».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе диссертационного исследования получены следующие результаты:

- 1) проведён анализ технологий для создания современных трёхмерных геоинформационных систем и используемых в них форматов карт, представлены различия между векторными и растровыми видами карт по типам хранимых в них объектов (полигонов, линий, точек), из чего возникает необходимость создания процедур для чтения, отображения и записи этих карт и конвертеров для их преобразования при разработке 3D ГИС;
- 2) разработана двухкомпонентная модель проектирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки с использованием свободно распространяемых ресурсов (библиотек), включающая функциональную модель, которая используется для формирования покрытий заданной функциональности 3D ГИС на основе матрицы соответствия доступных для использования функций и реализующих их библиотек, и геометрическую модель – для оценки затрат на его разработку в виде круговой диаграммы;
- 3) предложена система автоматизации проектирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки на основе специализированного CASE-средства проектирования 3D ГИС и системы 3D-моделирования проектных решений, обеспечивающая снижение ресурсных затрат (время, финансы) и требований к разработчику, использование современных информационных технологий и разработок, генерирующая и оценивающая проектные решения для последующей их реализации;
- 4) разработана модель и программная реализация специализированного CASE-средства проектирования 3D ГИС, позволяющего использовать современные информационные технологии в виде свободно-распространяемых ресурсов: библиотек, текстур, моделей высот и глубин, 3D-моделей объектов, а также формировать готовые проектные решения, отвечающие требованиям на разработку 3D ГИС;
- 5) разработаны базы моделей, диаграмм, алгоритмов проектирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки, которые позволяют генерировать проектные решения 3D ГИС и реализовывать их с использованием свободно распространяемых библиотек и собственных разработок;

- 6) разработан комплекс алгоритмов функционирования 3D ГИС отображения ситуационной обстановки, включающий 13 алгоритмов, которые реализуют многорежимный приём и обработку данных, обеспечивают отображение морской, наземной и воздушной ситуационных обстановок с заданной точностью и могут быть использованы на практике разработчиками;
- 7) создана система 3D-моделирования проектных решений, которая позволяет проводить их визуальную оценку в большинстве режимов обстановки, встречаемых в реальном мире.

Список опубликованных работ по теме диссертации.

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных **Перечнем ВАК России**:

1. Булаев А.А., Липатова С.В., Мерзляков Д.А., Смагин А.А. CASE-средство проектирования 3D-ГИС на основе свободно распространяемых библиотек // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 2 (44). – С. 35-44.
2. Булаев А.А., Липатова С.В., Смагин А.А. Система автоматизированного проектирования и моделирования 3D ГИС // Вестник НГИЭИ. – 2017. – №4. – С. 18-31.
3. Смагин А.А., Булаев А.А., Липатова С.В. Модель покрытия структуры программного комплекса с использованием библиотек // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 4 (50). – С. 59-66.
4. Булаев А.А. Оценка адекватности проектных решений 3D ГИС отображения ситуационной обстановки // Наука и бизнес: пути развития. – М.: ТМБпринт. – 2017. – № 8 (74). – С. 9-14.

В иных изданиях:

5. Булаев А.А., Кукин Е.С., Леонтьев М.Ю., Смагин А.А. Система отображения морской, наземной и воздушной обстановки на трехмерной модели Земли // Учёные записки УлГУ. – 2014. – № 1 (6). – С. 5-11.
6. Булаев А.А., Смагин А.А., Липатова С.В. Система автоматизированного проектирования и моделирования 3D ГИС // Перспективные информационные технологии. – 2017. – С. 51-54
7. Булаев А.А. Режимы отображения обстановки в 3D ГИС // Учёные записки УлГУ. – 2017. – № 1. – [Электронный ресурс].
8. Булаев А.А., Смагин А.А. Проектирование системы 3D ГИС визуализации на базе свободно распространяемых ресурсов // III Международная научно-техническая интернет-конференция ИСиТ-2015. – 2015 г.
9. Смагин А.А., Булаев А.А. Профессионально ориентированная информационная сеть кафедры вуза // Учёные записки УлГУ. – 2014. – № 1 (6). – С. 171-179.
10. Смагин А.А., Булаев А.А. Профессионально-ориентированная информационная сеть кафедры вуза // XIII Международная научно-методическая конференция образовательных организаций реального направления подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». – 2014. – С. 153-155.

Подписано в печать 14.03.2018.

Формат 60x84/16. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 120 экз.

Заказ №15/

Отпечатано в Издательском центре
Ульяновского государственного университета
432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42