

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова
Российской академии наук

На правах рукописи

Леонов Андрей Владимирович

**ВИРТУАЛЬНОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ИСТОРИИ НАУКИ И ТЕХНИКИ**

Специальность 07.00.10 – История науки и техники
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. ИСТОРИЯ И АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ВИРТУАЛЬНОГО 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИСТОРИИ НАУКИ И ТЕХНИКИ.....	24
1.1 Краткий обзор мирового и российского опыта виртуального 3D-моделирования в истории науки и техники.....	24
1.2 Основные проблемы в сфере 3D-моделирования объектов истории науки и техники.....	35
1.2.1 Проблема 3D-моделирования крупномасштабных объектов.....	35
1.2.2 Проблема общедоступного представления 3D- моделей.....	40
1.3 Анализ терминологии и определение понятия «виртуальный».....	44
1.4 Выводы по главе 1.....	51
Глава 2. РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ВИРТУАЛЬНОМУ 3D- МОДЕЛИРОВАНИЮ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ ИСТОРИИ НАУКИ И ТЕХНИКИ.....	54
2.1 Виртуальное 3D-моделирование крупномасштабного технического объекта: на примере Шуховской башни на Шаболовке.....	54
2.1.1 Мотивация выполнения работы.....	55
2.1.2 Лазерное сканирование и создание точечной 3D- модели.....	56
2.1.3 Разработка методики моделирования.....	58
2.1.4 Создание полигональной 3D-модели.....	60
2.1.5 Сравнение с аналогичными работами.....	65
2.1.6 Анализ отличий реальной конструкции от исторической документации.....	66
2.1.7 Анализ и оценка новизны результатов.....	79
2.2 Виртуальное 3D-моделирование крупномасштабного природного объекта: на примере Долины гейзеров на Камчатке.....	83
2.2.1 Мотивация выполнения работы.....	84

2.2.2	Разработка методики работы	85
2.2.3	Создание и геопривязка 3D-модели территории	87
2.2.4	Исследование истории картографии и топонимики и создание каталога термальных объектов.....	92
2.2.5	Разработка интерактивного 3D-приложения на основе виртуального глобуса.....	99
2.2.6	Сравнение с аналогичными работами	102
2.2.7	Анализ и оценка новизны результатов	103
2.3	Примеры применения разработанных подходов для виртуального 3D-моделирования технических и природных объектов	106
2.3.1	Электромобиль «Колумбия».....	106
2.3.2	Крейсер «Аврора».....	119
2.3.3	Скульптура «Родина-мать зовет!»	126
2.3.4	Денисова пещера на Алтае.....	130
2.4	Выводы по главе 2.....	150
Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ		153
3.1	Создание 3D-презентаций для представления объектов истории науки и техники.....	153
3.1.1	Разработка интерактивных 3D-презентаций для систем виртуальной реальности на основе OpenSceneGraph	162
3.1.2	Разработка интерактивных 3D-приложений для доступа через интернет на основе Unity3D и WebGL.....	176
3.1.3	Практическая ценность интерактивных 3D- презентаций	180
3.2	Применение интерактивных 3D-моделей (3D- презентаций) для прикладных задач	181
3.2.1	Создание интерактивной 3D-модели действующего технического объекта (электростанции)	184
3.2.2	Разработка интерфейса для взаимодействия с интерактивной 3D-моделью технического объекта	188
3.2.3	Применение интерактивной 3D-модели действующего технического объекта	203
3.3	Представление 3D-моделей на виртуальном глобусе	209

3.3.1	Виртуальный глобус: история развития и перспективы.....	209
3.3.2	Обзор подходов к процедурной генерации объектов на виртуальных глобусах	231
3.3.3	Применение виртуального глобуса для визуализации объектов истории науки и техники	241
3.4	Выводы по главе 3.....	253
Глава 4. РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ВИРТУАЛЬНОГО МУЗЕЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ.....		255
4.1	3D-модель как документ нового типа: 3D-документ	255
4.1.1	Структура и отображение 3D-документов.....	257
4.1.2	Восприятие 3D-документа	260
4.1.3	Типы 3D-документов.....	262
4.1.4	Актуальность применения 3D-документов.....	264
4.1.5	3D-документ как историко-технический источник.....	271
4.1.6	Проблемы внедрения 3D-документов в электронный документооборот.....	273
4.2	Правовой режим 3D-документов	275
4.2.1	Понятие 3D-документа.....	277
4.2.2	Правовая природа 3D-документа.....	283
4.2.3	3D-документ как единая технология: обсуждение.....	290
4.3	Создание виртуального музея науки и техники на основе 3D-документов.....	292
4.3.1	Актуальность создания виртуальных музеев.....	292
4.3.2	Анализ технических рекомендаций Минкультуры России по созданию виртуальных музеев	296
4.3.3	Прототип виртуального музея истории науки и техники на WebGL	303
4.4	Выводы по главе 4.....	305
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		307
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....		316
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		320

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Компьютерные технологии все шире применяются для создания цифровых копий (моделей) и виртуальной реконструкции объектов культурного и природного наследия, в том числе и тех, которые являются предметом исследования историков науки и техники. Еще в 2003 г. на 32-й Генеральной конференции ЮНЕСКО была принята «Хартия о сохранении цифрового наследия», где отмечается следующее:

«Цифровое наследие состоит из уникальных ресурсов человеческих знаний и форм их выражения. Оно охватывает ресурсы в области культуры, образования, науки и управления, а также информацию технического, правового, медицинского и другого характера, созданную в цифровом виде или переведенную в цифровую форму из существующих аналоговых ресурсов. В случае «цифрового происхождения» ресурсы существуют лишь в виде цифрового объекта.

Цифровые материалы включают тексты, базы данных, неподвижные и движущиеся изображения, звуковые и графические материалы, программное обеспечение и веб-страницы, представленные в широком и постоянно увеличивающемся диапазоне форматов. Они часто недолговечны и для того, чтобы их сохранить, требуются целенаправленные усилия на их производство, техническое обслуживание и управление ими.

Многие из этих ресурсов имеют непреходящую ценность и значимость и поэтому представляют собой наследие, которое следует сохранять и защищать для современных и будущих поколений. Это постоянно растущее наследие может существовать на любом языке, в любой части мира и относиться к любой сфере человеческих знаний и средств выражения» [Хартия..., 2003]. Цифровое наследие (Digital Heritage) называют также «виртуальным наследием» (Virtual Heritage). В данной работе термины «виртуальный» и «цифровой» употребляются как синонимы.

В концепции ФЦП «Культура России (2012 - 2018 годы)» отмечено, что формирование и развитие культурной среды становится важнейшим условием улучшения качества жизни в Российской Федерации. Отмечается, что к приоритетным задачам, безусловно, относится сохранение культурных ценностей, обеспечение широкого доступа к ним для всех социальных слоев, информатизация отрасли, поддержание высокого престижа российской культуры за рубежом, расширение международного культурного сотрудничества, создание позитивного культурного образа России в мировом сообществе. Создание и развитие виртуального (цифрового) наследия, безусловно, лежит в русле заявленных приоритетов.

Одной из наиболее современных и технически сложных форм цифрового наследия являются виртуальные трехмерные модели (3D-модели). Возрастающая популярность применения 3D-моделей в различных областях науки, техники и медицины обусловлена стремительным развитием методов и технологий лазерного сканирования, фотограмметрии, трехмерного компьютерного моделирования, повышением доступности соответствующего оборудования и программного обеспечения. Сегодня виртуальные 3D-модели широко применяются для изучения объектов культурного наследия, их сохранения и визуализации [3D Recording..., 2016].

Наиболее активно виртуальные 3D-модели применяются в археологии, количество проектов в области «виртуальной археологии» исчисляется тысячами [Бородкин, Жеребятьев, 2012]. В России Государственный Эрмитаж уже дважды проводил международные конференции «Виртуальная археология», в 2012 и 2015 гг. [Виртуальная археология..., 2013], [Виртуальная археология..., 2015]. Тематика цифровой фиксации и виртуальной реконструкции археологических памятников, исторической архитектурной реконструкции широко представлена в работах группы «Археолого-географические информационные системы» (АГИС) ИА РАН (рук. – д. и. н. Д. С. Коробов) и кафедры исторической информатики исторического факультета МГУ (рук. – чл.-корр. РАН Л. И. Бородкин).

Наследие в области истории науки и техники также является важной частью мирового культурного наследия. Однако применение виртуальных 3D-моделей для изучения и популяризации истории науки и техники – как в России, так и в мире в целом – находится в начальной стадии. Это связано, прежде всего, с высокой сложностью трехмерного моделирования исторических технических объектов, процессов и комплексов, особенно крупномасштабных, а также высокой сложностью создания общедоступных средств интерактивной визуализации созданных 3D-моделей.

В то же время, потенциал применения виртуальных 3D-моделей для задач сохранения, изучения и представления (визуализации) различных объектов, связанных с историей науки и техники, чрезвычайно велик. Виртуальные 3D-модели могут применяться для сохранения точной и детальной информации о текущем состоянии памятников техники, изучения их конструкции, анализа исторической документации, виртуальной реконструкции утраченных объектов или их элементов, динамической визуализации (анимации) исторических механизмов, экспериментов, технологических процессов и комплексов. Виртуальное 3D-моделирование может применяться также для сохранения в цифровой форме, реконструкции, изучения и визуализации природных объектов, связанных с историей науки и техники, визуализации и изучения исторических массивов данных, в том числе на основе виртуального глобуса [Бобков, Леонов, 2017].

Важным направлением использования виртуальных 3D-моделей является также популяризация истории науки и техники, создание виртуальных экспонатов и виртуальных музеев [Батурин и др., 2011], [Леонов, 2012в], [Леонов, Бобков, 2013], [Щербинин, 2014], [Леонов, 2015е]. Отметим, что актуальность создания виртуальных музеев признана в России на государственном уровне: согласно Указу Президента Российской Федерации № 597 «О мероприятиях по реализации государственной социальной политики» от 7 мая 2012 г., к 2018 г. в России должно быть

создано 27 виртуальных музеев. Методическая и технологическая база для решения этой задачи в настоящее время находится на этапе становления.

В 2014 г. Министерством культуры РФ были разработаны технические рекомендации по созданию виртуальных музеев, которые описывают три варианта реализации виртуального музея: на основе фотографий, на основе сферических фотопанорам и на основе 3D-моделей [Технические рекомендации..., 2014]. Очевидно, что актуальность применения виртуальных 3D-моделей различается для разных типов музеев. Хотя многие музеи обладают трехмерными экспонатами (например, скульптурами или предметами обихода), разработка виртуального музея на основе 3D-моделей, в том числе динамических (анимированных) 3D-моделей, наиболее актуальна в области истории науки и техники.

В частности, одним из возможных направлений развития виртуального музея науки и техники представляется виртуальная реконструкция технических объектов, которые частично или полностью утрачены, либо находятся в плачевном техническом состоянии. Под виртуальной реконструкцией понимается восстановление исторического образа объекта в форме визуально реалистичной цифровой трехмерной модели. Такая реконструкция может быть выполнена на основе сохранившихся частей или элементов объекта, анализа аналогичных объектов (например, экспонатов в коллекциях других музеев), доступных исторических описаний, фотографий, видеозаписей, схем, чертежей.

Актуальность применения виртуальной реконструкции исторических объектов науки и техники обусловлена следующими соображениями.

1. Виртуальная реконструкция технического объекта может быть выполнена с существенно меньшими затратами, чем его физическая реставрация и реконструкция. Бюджеты проектов по физической реставрации могут исчисляться миллионами рублей, найти финансирование в таком объеме может быть затруднительно даже для ценных экспонатов в статусных музеях. Бюджеты проектов по виртуальной реконструкции могут начинаться

со значительно меньших сумм. При этом виртуальная реконструкция, в отличие от физической, может выполняться поэтапно, по мере возможности (например, с постепенным повышением детализации 3D-модели). Этим виртуальная реконструкция принципиально отличается от физической реставрации, которая должна быть завершена полностью прежде чем экспонат сможет занять место в экспозиции музея.

2. Виртуальная реконструкция позволяет подготовиться к физической реставрации. В ходе виртуальной реконструкции выполняется общий анализ устройства объекта, моделирование утраченных деталей (включая историко-техническое обоснование), проверяется общая пространственная компоновка объекта с учетом реконструированных элементов, выявляется недостаток данных для восстановления каких-либо элементов или несоответствие имеющихся данных фактической геометрии объекта. Профессиональная реставрация сложного технического объекта сегодня все чаще включает его 3D-моделирование как обязательную составную часть планирования реставрационных работ. В случае если 3D-моделирование объекта уже было выполнено, реставраторы могут воспользоваться его результатами.

3. Виртуальная трехмерная реконструкция позволяет представить образ объекта широкой публике намного более полно, чем традиционные средства (фотографии, текстовые описания). Прежде всего, это важно в той ситуации, когда объект находится в запасниках и не демонстрируется публике ввиду своего плохого состояния. Образ объекта может быть представлен как в форме мультимедийной презентации в рамках музейной экспозиции (например, в форме видеоролика или интерактивной 3D-модели на сенсорном экране), так и в форме веб-приложения на сайте музея или организаций – партнеров музея.

4. Виртуальная реконструкция позволяет восстановить несколько вариантов объекта. Это может быть актуально в тех случаях, когда существует несколько конкурирующих гипотез (например, о внутреннем устройстве объекта), выбор между которыми в настоящее время не может

быть сделан ввиду недостатка данных, или в тех случаях, когда объект существовал в нескольких модификациях. Физическая реставрация и реконструкция позволяет воссоздать только один вариант объекта, который и будет представлен в музейной экспозиции.

5. Виртуальная реконструкция позволяет демонстрировать внутреннее устройство объекта. В традиционной музейной экспозиции, демонстрация внутреннего устройства осуществляется посредством препарирования экспоната (например, вырезания «окон» в корпусе, частичного распила внутренних элементов и т. п.). Для ценных экспонатов в хорошей сохранности препарирование не выполняется, таким образом, их внутреннее устройство остается недоступным для просмотра. В то же время, при просмотре виртуальной модели можно легко управлять видимостью либо прозрачностью отдельных элементов (например, корпуса), что позволяет изучать внутреннее устройство объекта и его элементов.

6. Виртуальная реконструкция позволяет показать объект в динамике. В традиционной музейной экспозиции, даже прекрасно сохранившиеся экспонаты демонстрируются в статичном виде (более того – чем более ценен экспонат, тем меньше манипуляций с ним допускается). В отличие от самого экспоната, его виртуальный образ может быть анимирован для демонстрации его действия: например, можно показать работу механических систем, визуализировать работу электрической схемы и т. п. Этот пункт в равной степени относится к музейным экспонатам в любой степени сохранности.

Необходимо подчеркнуть, что виртуальная реконструкция не является заменой физической реконструкции и реставрации объекта. Напротив, она может быть использована для того, чтобы лучше подготовиться к физической реконструкции и реставрации объекта, и дополнить ее теми возможностями, которые невозможно реализовать для самого музейного экспоната.

Виртуальная реконструкция – не единственный пример преимуществ виртуального моделирования в музейных приложениях и задачах

популяризации. Есть целый ряд задач, которые могут быть решены только в виртуальной форме, в частности:

1) демонстрация в музейной экспозиции объектов большого масштаба (например, технических объектов: домны, прокатные станы, башни, мосты, верфи, шахты и т. п.);

2) демонстрация в рамках единой экспозиции территориально разнесенных объектов, которые невозможно переместить физически в одно место (например, экспонатов из коллекций разных музеев);

3) демонстрация разрушенных, утраченных объектов, восстановленных по чертежам или фотографиям, воссозданных в форме цифровых 3D-моделей;

4) динамическая визуализация работы исторических технических устройств (в т. ч. существующих музейных экспонатов), технологических процессов, исторических экспериментов;

5) динамическая визуализация исторических процессов (в том числе, связанных с историей науки и техники), в том числе, с географической привязкой к виртуальным картам или виртуальному глобусу.

Трехмерная модель, снабженная соответствующим программным инструментарием, позволяет пользователю самостоятельно осматривать и изучать объект, включая его внешний вид и внутреннее устройство, «путешествовать» по виртуальной модели. «Геймификация» [Marczewski, 2012] процесса ознакомления с объектом в музейной экспозиции способна существенно повысить заинтересованность пользователя, особенно среди молодежной и детской аудитории.

Виртуальная 3D-модель представляет собой новый способ сохранения информации и таким образом является новым типом документа – 3D-документом [Леонов, Батулин, 2013]. Принципиальным отличием 3D-документа от других известных типов документов (текстовых документов, рисунков, кинофотофонодокументов) является сохранение информации об объекте в некоторой трехмерной системе координат, связанной с объектом. В

свою очередь, 3D-документ, как и любой другой тип документа, может рассматриваться как историко-научный и историко-технический источник. Введение этого нового типа источников в научный оборот, освоение предоставляемых ими возможностей, исследование задач архивного хранения 3D-документов и их правового статуса — актуальные и слабо разработанные проблемы [Леонов, 2014б], [Леонов, 2016].

Таким образом, тематика работы имеет высокую научную и практическую актуальность.

Степень разработанности проблемы. Исследуемая в диссертации проблематика носит междисциплинарный характер.

Трехмерные образы объектов (цифровые 3D-модели) в последнее время получают все более широкое распространение в науке, технике, медицине. Конструкторская документация в современных системах автоматизированного проектирования (САПР) может проходить весь свой жизненный цикл (создание, утверждение, передачу в производство, архивацию для длительного хранения) в цифровом 3D-формате, без вывода комплекта бумажных документов — соответствующая технология получила название PLM (Product Lifecycle Management, «управление жизненным циклом продукции»). В строительстве все шире внедряется технология BIM (Building Information Modeling, «информационное моделирование зданий») — управление информацией об объекте (здании, сооружении) на всех этапах его жизненного цикла в рамках единой электронной информационной системы, основанной на трехмерной цифровой модели этого объекта. Подходы к обработке, хранению, комплексному анализу трехмерных образов активно развиваются в медицине, в том числе, в связи с развитием методов и технологий компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии. Большое количество цифровых трехмерных данных генерируется (регистрируется) в различных областях науки, прежде всего, молекулярной биологии, химии, материаловедении, сейсмологии. Оборудование и особенно программное обеспечение для работы с трехмерными данными постоянно

развивается и становится все более доступным для широких кругов исследователей. Не удивительно, что виртуальное 3D-моделирование с использованием лазерного сканирования, фотограмметрии и других технологий постепенно начинает использоваться также в задачах изучения, сохранения и популяризации объектов культурного наследия.

Одной из первых областей науки, где начали широко применяться методы виртуального (цифрового, компьютерного) трехмерного моделирования объектов исследования, стала археология. Еще в 1990 г. П. Рейли (P. Reilly), один из пионеров применения компьютерного 3D-моделирования и визуализации для изучения археологических объектов, ввел в научный оборот термин «виртуальная археология» (virtual archaeology) [Reilly, 1990]. В число основных задач данного направления входят фиксация информации об объектах исследования (3D-документирование), их виртуальная реконструкция, визуальный анализ археологических данных и проверка гипотез, обеспечение широкого доступа к информации об объектах исследования и создание виртуальных музеев.

Более 20 лет направление виртуальной археологии (англ. virtual archaeology, digital archaeology) активно развивается в мире. Регулярно проводятся крупные международные конференции по этой тематике, такие, как EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage – Семинар по графике и культурному наследию Европейской ассоциации по компьютерной графике; International Symposium on Virtual Reality; Archaeology and Cultural Heritage (VAST) – Международный симпозиум по виртуальной реальности, археологии и культурному наследию; International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM) – Международная конференция по виртуальным системам и мультимедиа; ISPRS International Workshop “3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH)” – Международный семинар «Трехмерная виртуальная реконструкция и визуализация сложных архитектурных сооружений» Международного общества по фотограмметрии и дистанционному

зондированию. Статьи о выполненных проектах публикуются в ведущих научных журналах, таких как Journal of Cultural Heritage; Virtual Reality; IEEE Computer Graphics and Applications; The Photogrammetric Record; Sensors; ISPRS Archives; IEEE Multimedia; Journal on Computing and Cultural Heritage; Science and Technology for Cultural Heritage; Applied Geomatics; Remote Sensing.

Один из известных пропагандистов виртуальной археологии Д. Сандерс (D. Sanders) отмечает, что *«виртуальные миры представляют археологам лучший способ проверки сложных пространственных, поведенческих и временных гипотез»* [Bawaya, 2010, С. 140]. Общее число созданных на сегодняшний день 3D-моделей археологических объектов измеряется, по-видимому, многими тысячами; только в Интернете к 2010 г. было представлено не менее 1000 виртуальных моделей [Bawaya, 2010]. Например, широко известен проект создания виртуальной 3D-модели античного Рима “Rome Reborn”, (<http://romereborn.frischerconsulting.com/>).

Статьи о российских проектах по виртуальному моделированию археологических объектов можно найти в публикациях ассоциации «История и компьютер», трудах международных конференций «Электронные изображения и визуальные искусства» (Electronic Imaging & the Visual Arts, EVA) и «Археология и геоинформатика» (АГИС). В 2012 и 2015 гг. Государственный Эрмитаж провел две международные конференции по виртуальной археологии, на которых были представлены десятки докладов в сфере виртуального моделирования и реконструкции. Обзор технологий 3D-моделирования в археологических исследованиях и примеры проектов, в том числе, выполненных российскими исследователями, приведен в статье [Бородкин, Жеребятьев, 2012].

Исторические технические объекты (а также другие объекты, являющиеся предметом изучения историков науки и техники) также являются важной частью мирового культурного наследия. Однако подробный обзор мирового опыта по 3D-моделированию историко-

технических объектов показал, что данная сфера является до сих пор относительно малоизученной, по сравнению с виртуальным моделированием художественных объектов культурного наследия (скульптур, археологических находок и т. п.) — вероятно, по причине существенно большей сложности технических объектов, особенно крупных. Известно о ряде проектов по виртуальному моделированию и виртуальной реконструкции различных научно-технических экспонатов, выполненных (или выполняемых) отдельными рабочими группами в разных странах мира [Рысь, Леонов, 2016]; в то же время, общее число выполненных проектов по этой тематике во всем мире исчисляется десятками (в отличие от многих тысяч проектов «виртуальной археологии»). Примеры 3D-моделирования крупномасштабных объектов истории науки и техники и вовсе можно пересчитать по пальцам, также как и примеры предоставления широкого доступа к созданным 3D-моделям.

Важность трехмерной фиксации информации о существующих памятниках техники и архитектуры, особенно находящихся под угрозой разрушения, также как и важность сохранения цифровых 3D-моделей как «цифрового наследия», к сожалению, осознается очень медленно. Первичная трехмерная информация, особенно получаемая коммерческими компаниями, зачастую не сохраняется исполнителем работ после их завершения, либо оказывается недоступной для изучения. Государственные и ведомственные архивы по большей части без энтузиазма относятся к задаче хранения первичных трехмерных данных, поскольку с этим связаны объективные технические и методические сложности. Объем таких данных может составлять десятки гигабайт, а их воспроизведение требует закупки специальной компьютерной техники и программного обеспечения. В результате, даже уже полученная ценная трехмерная информация об уникальных объектах нередко теряется, не сохраняется для будущих поколений.

Отметим, что аналогичная ситуация наблюдалась около ста лет назад с кинофотофонодокументами (КФФД), и по-видимому является типичной для начального этапа освоения нового типа документов. Как отмечал В. М. Магидов: «...государственное хранение КФФД как документальных свидетельств эпохи стало обеспечиваться только во второй половине 1920-х гг.... мы сталкиваемся с многочисленными примерами утраты ценных кинофотокадров и фрагментов радио- и телепередач и целых произведений... Нельзя не учитывать также сложности взаимоотношений между государственными и ведомственными архивами... В результате в отечественных архивах отсутствуют полные комплекты кинофонодокументов; большая часть КФФД не сохранилась в полном объеме, в оригинале и в первоначальном монтаже» [Магидов, 1993].

Таким образом, проблематика виртуального 3D-моделирования в области истории науки и техники, несмотря на свою высокую актуальность и практическую значимость, слабо разработана. Несмотря на все более широкое распространение трехмерных данных и виртуальных 3D-моделей, в арсенале историков науки и техники они пока представлены слабо, а их возможности и потенциал использования не изучены в полной мере. С технической точки зрения, наименее разработанной является проблематика 3D-моделирования крупномасштабных технических и природных объектов, а также обеспечение широкого доступа к созданным 3D-моделям — как для исследовательских задач, так и для задач популяризации.

Данные обстоятельства обусловили выбор темы, цель и задачи настоящего диссертационного исследования.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в изучении возможностей применения современных средств 3D-моделирования для задач истории науки и техники, и разработке методов и технологий создания и представления (визуализации) 3D-моделей объектов истории науки и техники, прежде всего крупномасштабных технических и природных объектов.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих взаимосвязанных задач диссертационной работы:

— анализ мирового и российского опыта виртуального 3D-моделирования и реконструкции объектов истории науки и техники, выявление наиболее актуальных направлений исследования;

— разработка методов и технологий виртуального 3D-моделирования крупномасштабных технических и природных объектов и процессов, их апробирование на примере реальных объектов;

— обоснование эффективности применения методов виртуального 3D-моделирования для задач изучения объектов истории науки и техники;

— разработка методического и технического инструментария для представления (визуализации) виртуальных 3D-моделей объектов истории науки и техники;

— развитие методических и технических подходов к созданию виртуальных музеев на основе виртуальных 3D-моделей.

Объектом исследования являются виртуальные 3D-модели технических и природных объектов, связанных с историей науки и техники, а также методы и технологии их создания и представления (визуализации).

В качестве **предмета исследования** выступают возможности повышения эффективности изучения, сохранения и популяризации технических и природных объектов, связанных с историей науки и техники, за счет их виртуального 3D-моделирования.

В ходе диссертационного исследования получены следующие результаты, обладающие **научной новизной**:

1. Выявлен новый инструмент сохранения, изучения и популяризации истории науки и техники – цифровое 3D-моделирование технических и природных объектов, процессов и комплексов. Проанализированы методы и технологии цифрового 3D-моделирования и выделены те из них, которые могут эффективно применяться в задачах истории науки и техники.

2. Впервые применено цифровое 3D-моделирование для историко-научного и историко-технического изучения крупномасштабных технических и природных объектов.

3. Впервые использованы современные технологии фиксации трехмерной информации (лазерное сканирование и фотограмметрия) для цифрового 3D-моделирования, виртуальной реконструкции и интерактивной 3D-визуализации крупномасштабных памятников техники, музейных технических экспонатов и природных объектов, связанных с историей науки.

4. Разработаны новые методы и технологии цифрового 3D-моделирования крупномасштабных технических и природных объектов, обеспечивающие сочетание высокой точности, детализации и визуальной реалистичности при отображении в режиме реального времени.

5. Разработаны новые методы и технологии представления виртуальных 3D-моделей крупномасштабных объектов и процессов, в том числе связанных с историей науки и техники, на основе виртуального глобуса (цифровой трехмерной модели Земли).

6. Разработаны новые методы и технологии создания интерактивных 3D-презентаций, в том числе с поддержкой стерео-режима и со свободным доступом через интернет с применением современных технологий визуализации трехмерной графики в браузере.

7. Созданы компьютерные программы, обеспечивающие представление виртуальных 3D-моделей различных объектов и процессов на системах виртуальной реальности. Получено (в соавторстве) шесть свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

8. Впервые дано научное определение 3D-документа. Показано, что принципиальным отличием 3D-документа от других известных типов документов является сохранение информации об объекте в трехмерной системе координат, связанной с объектом. Выделено три вида 3D-документов: первичные трехмерные данные, метрически точная трехмерная документация, трехмерный рисунок.

9. Разработана концепция нового научного направления – виртуальной истории науки и техники, сформулированы его цели, задачи, предмет и методы исследования.

10. Впервые предложен комплексный подход к созданию виртуального музея науки и техники на основе 3D-документов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Впервые применено цифровое 3D-моделирование для историко-научного и историко-технического изучения крупномасштабных технических и природных объектов, что позволило получить новые данные об истории и современном состоянии этих объектов, а также об истории их изучения и документирования.

2. Разработаны методы и технологии цифрового 3D-моделирования крупномасштабных технических и природных объектов, обеспечивающие сочетание высокой точности, детализации и визуальной реалистичности при отображении в режиме реального времени.

3. Разработаны методы и технологии создания интерактивных 3D-демонстраций с поддержкой стерео-режима для систем виртуальной реальности, а также интерактивных 3D-приложений со свободным доступом через интернет с применением современных технологий визуализации трехмерной графики в браузере, обеспечивающие широкий доступ к виртуальным 3D-моделям крупномасштабных технических и природных объектов для их исследования и популяризации.

4. Доказано, что виртуальное 3D-моделирование и 3D-реконструкция технических и природных объектов, процессов и комплексов является эффективным методом исследования их структуры (конструкции), в том числе в ее историческом развитии.

5. Доказано, что цифровая 3D-модель представляет собой новый тип документа: 3D-документ. Впервые предложен комплексный подход к созданию виртуального музея науки и техники на основе 3D-документов.

Теоретическая значимость работы состоит в исследовании нового типа документов – 3D-документов, анализе возможностей их применения в истории науки и техники, и разработке основных подходов новой научной дисциплины (направления) – виртуальной истории науки и техники.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов при разработке (создании) виртуальных 3D-моделей объектов истории науки и техники для их изучения, сохранения и популяризации, в том числе для создания виртуальных экспонатов для виртуального музея науки и техники. Практическая значимость подтверждена шестью свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Изложенные в работе предложения и практические рекомендации могут быть учтены: государственными органами власти при разработке национальной стратегии сохранения и изучения памятников природы и культуры, включая памятники науки и техники; министерствами и ведомствами Российской Федерации при определении основных направлений музейной политики в области создания виртуальных музеев как на федеральном, так и на региональном и местном уровнях; институтами гражданского общества при разработке и реализации программ сохранения культурного наследия, различных культурных проектов и инициатив; научными сотрудниками, специализирующимися на применении информационных технологий в истории науки и техники.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность основных результатов диссертационного исследования неоднократно подтверждалась в ряде докладов и выступлений на научных конференциях, среди которых следует отметить международную конференцию «Методы неогеографии и виртуального окружения в визуализации гео-данных» (15-17 сентября 2009 г., Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский), IV и V международные конференции «Туризм и рекреация: фундаментальные и прикладные

исследования» (2009 и 2010 г., Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва), 52-ю и 53-ю научные конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (2009 и 2010 гг., МФТИ, Долгопрудный), третью научно-техническую конференцию «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (9-15 октября 2011 г., Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский), международную научно-практическую конференцию «Реконструкция-реставрация Шуховской радиобашни в Москве» (29 ноября 2012 г., МГСУ, Москва), 22-ю международную конференцию по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон'2012» (01-05 октября 2012 г., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва), IV международную научно-практическую конференцию «Документ. Архив. История. Современность» (1-4 ноября 2012 г., Уральский университет, Екатеринбург), международную конференцию «Геофизические обсерватории, многофункциональные ГИС и распознавание в информационных массивах» (30 сентября - 3 октября 2013, Геофизический центр РАН, Калуга), международную научно-практическую конференцию, посвященную 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова «Архитектоника инженера В.Г. Шухова» (13-14 ноября 2013 г., МАРХИ, Москва), международную конференцию «Великий русский инженер В.Г. Шухов и его научное наследие», посвященную 160-летнему юбилею со дня рождения В.Г. Шухова (25-27 ноября 2013 г., ИПМех РАН, Москва), объединенную международную научно-практическую конференцию «Электронный век культуры» и «EVA 2013 Москва» (20–21 ноября 2013 г., РГБ, Москва), XX международную научно-практическую конференцию «Документация в информационном обществе: эффективное управление электронными документами» (20-21 ноября 2013 г., Росархив и ВНИИДАД, Москва), расширенное заседание Научно-технического Совета РГАНТД, посвященное 160-летию великого русского инженера, изобретателя В. Г. Шухова (10 сентября 2013 г., РГАНТД, Москва), научную конференцию «История науки и техники в

свидетельствах и памятниках» (24 апреля 2014 г., ИИЕТ РАН, Москва), VIII и IX международные научно-практические конференции «История техники и музейное дело» (2014 и 2015 гг., ИИЕТ РАН и Политехнический музей, Москва), международный конгресс «Гений В.Г. Шухова и современная эпоха» (2014 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва), 25-й межвузовский научный семинар «Геометрия и расчет тонких оболочек неканонической формы» (27 мая 2014 г., РУДН, Москва), заседание экспертной рабочей группы по теме «Шуховская башня в Москве» (инженерно-реставрационный консилиум) (08 июля 2014 г., РААСН, Москва), вторую международную конференцию «Виртуальная археология (эффективность методов)» (1–3 июня 2015 г., Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург), конференцию «Междисциплинарные подходы к истории науки и техники» (27 мая 2015 г., ИИЕТ РАН, Москва), вторые чтения по историографии и источниковедению истории науки и техники «История науки: источники, памятники, наследие» (2016 г., ИИЕТ РАН, Москва), ежегодные научные конференции ИИЕТ РАН в 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 гг. (ИИЕТ РАН, Москва), доклад на Ученом совете ИИЕТ РАН (26 июня 2014 г., Москва), III международную научную школу молодых ученых ИИЕТ РАН (2014 г., ИИЕТ РАН и ЦПК им. Ю.А. Гагарина, Королев), V международную научную школу молодых ученых ИИЕТ РАН (2016 г., ИИЕТ РАН и Дом русского зарубежья имени Александра Солженицына, Москва), а также зарубежные конференции: 2010 International Conference on Cyberworlds (20-22 октября 2010 г., Nanyang Technological University, Сингапур), IADIS International Conference on Computer Graphics, Visualization, Computer Vision And Image Processing 2011 (20-26 июля 2011 г., Рим, Италия), Seminar of the International D-A-CH Research Project “Konstruktionswissens der fruhen Moderne. Suchovs Strategien des sparsamen Eisenbaus” (18-21 февраля 2012 г., Institute of Conservation and Building Research (IDB), Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich), Цюрих, Швейцария).

Виртуальные 3D-модели технических и природных объектов, связанных с историей науки и техники, созданные под руководством и при непосредственном участии автора, демонстрируются или демонстрировались на Постоянно действующей выставке достижений Российской академии наук (ПДВ РАН, Москва), в Российском государственном архиве научно-технической документации (РГАНТД, Москва), Государственном центральном музее современной истории России (Москва), музее ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник» (г. Елизово Камчатского края), на выставках, конференциях и веб-сайте Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук (ИИЕТ РАН, Москва), мероприятиях Геофизического центра Российской академии наук (ГЦ РАН, Москва), а также используются или использовались для задач ФГБУ «Политехнический музей» (Москва), Института археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск), Центрального военно-морского музея (ЦВММ, Санкт-Петербург), ГосНИИАС (Москва), ФСК ЕЭС (Москва).

Основные научные публикации. По теме диссертационного исследования автором опубликовано 53 научных работы общим объемом около 67,75 п.л. (лично автором – 62,5 п.л.), в том числе 1 индивидуальная монография и 15 статей в журналах, рекомендуемых ВАК для публикации основных научных материалов диссертации на соискание ученой степени доктора наук. Также автором получено (в соавторстве) шесть свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, приравненных к публикациям в изданиях, рекомендованных ВАК России [Свид. 2015619269, 2015619270, 2015619271, 2015660907, 2015661073, 2015661074].

Объем и структура работы. Структура и содержание диссертации обусловлены целью и задачами настоящего исследования. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и списка литературы.

Глава 1. ИСТОРИЯ И АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ВИРТУАЛЬНОГО 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИСТОРИИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

1.1 Краткий обзор мирового и российского опыта виртуального 3D-моделирования в истории науки и техники

3D-моделирование историко-технических объектов – относительно молодое и слабо разработанное направление, по сравнению с виртуальным моделированием художественных объектов культурного наследия (скульптур, археологических находок и т. п.) или виртуальной реконструкцией исторических зданий и сооружений (т. е. направлением виртуальной археологии). Хотя ряд проектов по виртуальному моделированию и виртуальной реконструкции различных научно-технических экспонатов был выполнен отдельными рабочими группами в разных странах мира [Рысь, Леонов, 2016], общее число выполненных проектов по этой тематике во всем мире исчисляется десятками (в отличие от многих тысяч проектов виртуальной археологии). При этом более распространено 3D-моделирование компактных объектов (музейных экспонатов); примеры же 3D-моделирования крупномасштабных объектов истории науки и техники можно в буквальном смысле пересчитать по пальцам, также как и научные публикации о результатах таких работ.

Например, 3D-моделирование применялось при реконструкции Антикитерского механизма [Freeth et al., 2006]. Это уникальное греческое редукторное устройство, созданное в конце II века до нашей эры. Известно, что этот механизм использовался для расчета и отображения астрономических величин, в частности, фаз луны и лунно-солнечного календаря. Он был обнаружен в 1901 г. рядом с островом Антикитер при исследовании места кораблекрушения римского судна. Конкретные функции этого устройства и его конструкция до сих пор остаются спорными, поскольку зубчатые колеса и надписи сохранились лишь фрагментарно. Исследования уцелевших фрагментов устройства методами рентгенографии

позволили выдвинуть ряд гипотез о функциях шестерней и конструкции механизма в целом, для проверки которых использовалось, в том числе, и виртуальное 3D-моделирование, рисунок 1.1.

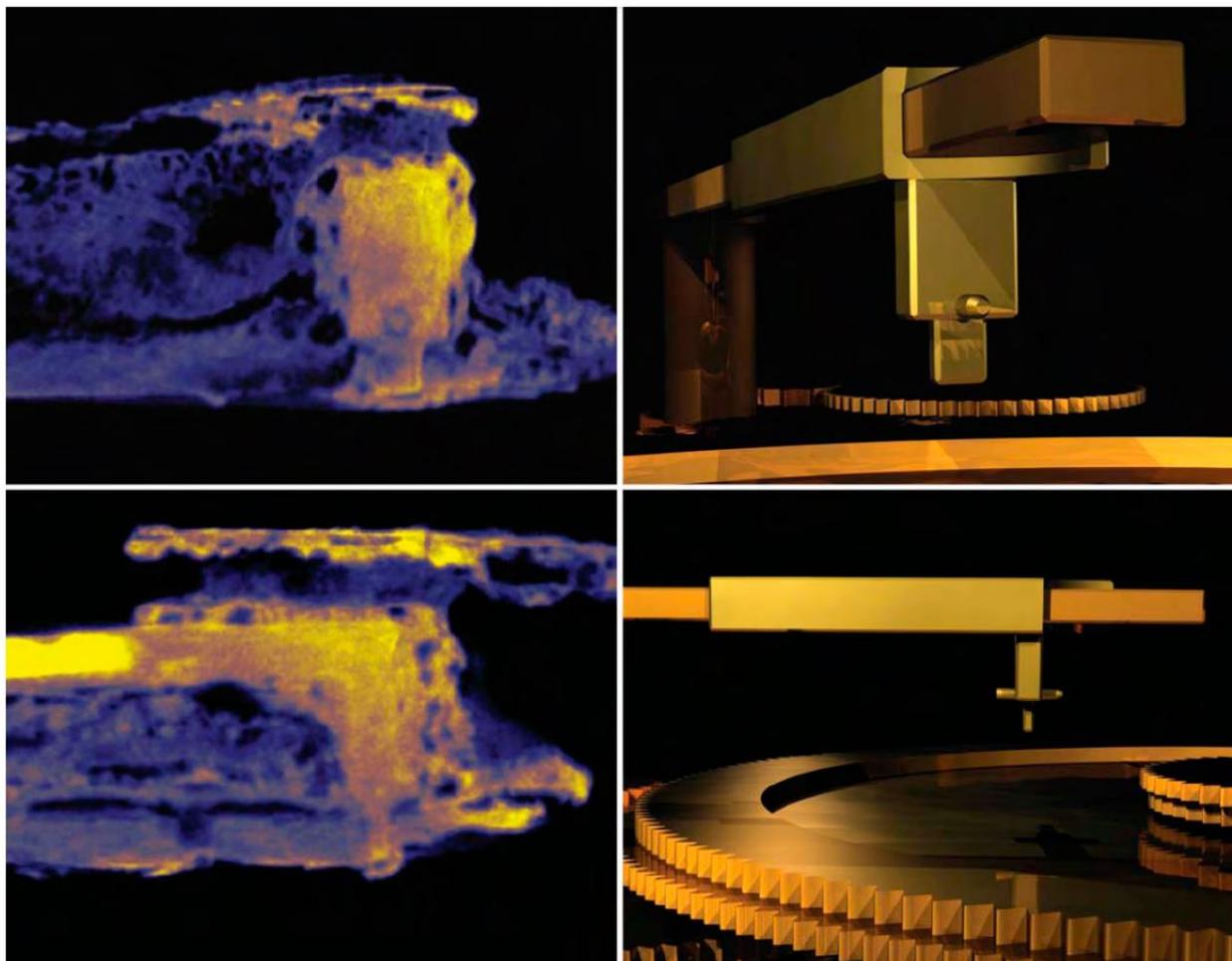


Рисунок 1.1 — Результаты компьютерной томографии элементов Антикитерского механизма (слева) и их виртуальная 3D-реконструкция (справа) [Freeth et al., 2006]

Виртуальная реконструкция сыграла важную роль при исследовании исторических глобусов (глобуса Бехайма 1492 г., глобусов Меркатора 1541 г. и 1551 г., глобуса Ленокса 1503-1507 гг.) [Menna et al., 2012], [Stal et al., 2012]. В частности, создание цифровых 3D-моделей глобусов позволило численно оценить точность их геометрических характеристик и определить погрешности изготовления разных частей, рисунок 1.2.

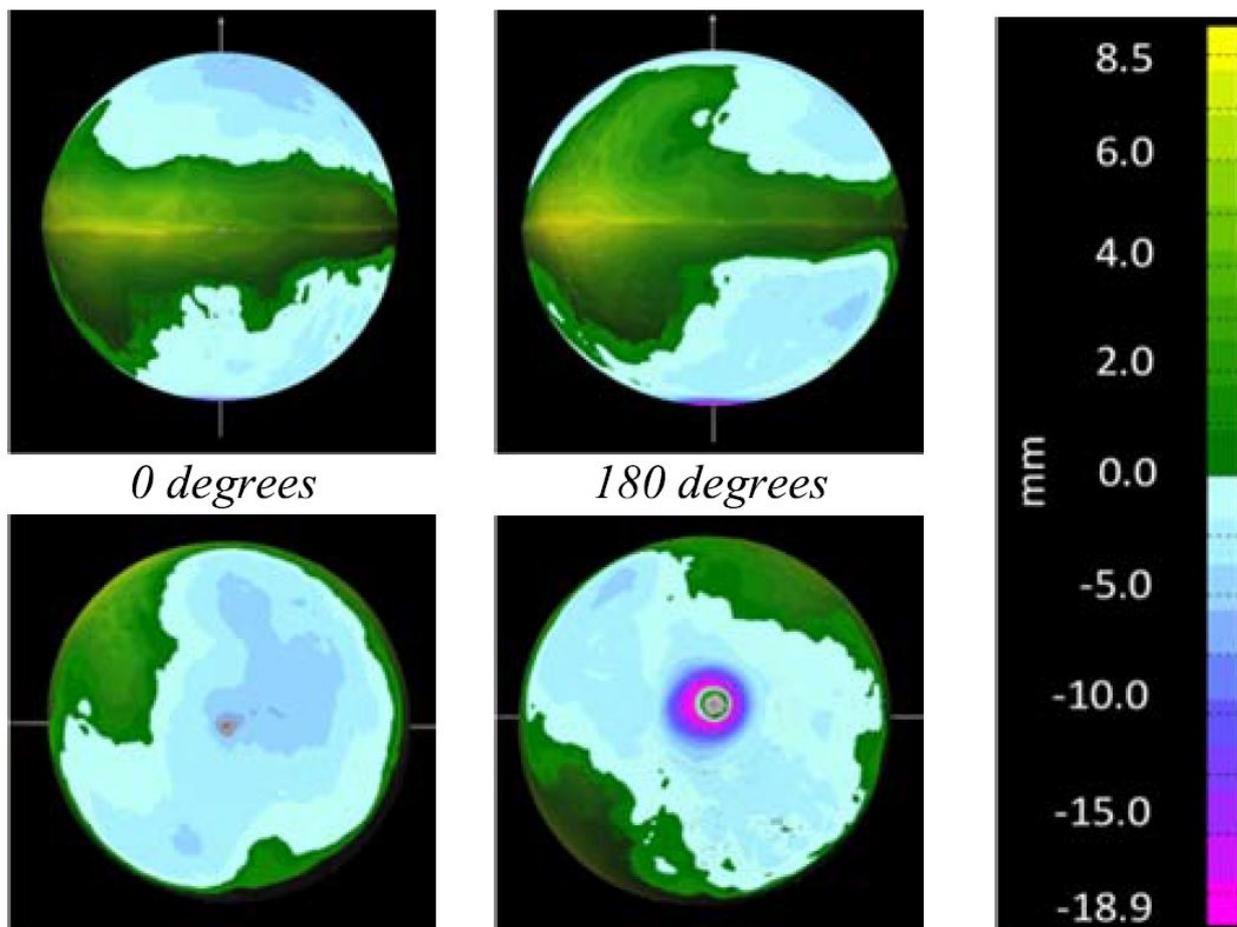


Рисунок 1.2 — Анализ отклонений геометрии глобуса Бехайма от сферы
[Menna et al., 2012]

При исследовании Стоунхенджа (ок. 3000 до н.э.) в 2002 и 2011 гг. производилось построение его 3D-модели на основе данных трехмерного лазерного сканирования [Unver, Taylor, 2012], [Abbott, Anderson-Whymark, 2012]. Исследование позволило выявить следы обработки на камнях, которые не удавалось обнаружить ранее. На основании этих данных были сделаны новые выводы о датах возведения частей комплекса. Виртуальная 3D-модель сооружения, объединенная с виртуальной 3D-моделью окружающей местности, позволила реконструировать процесс астрономических наблюдений, которые могли выполняться в этой древней обсерватории, и проверить связанные с этим гипотезы, рисунки 1.3 и 1.4.

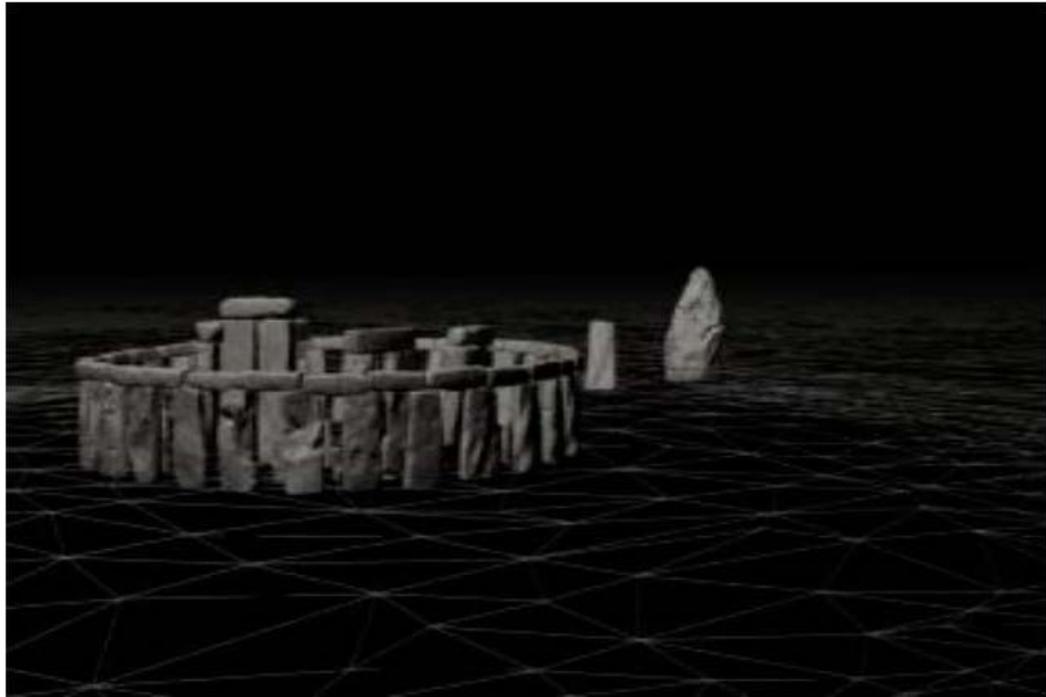


Рисунок 1.3 — Виртуальная 3D-модель Стоунхенджа, объединенная с виртуальной 3D-моделью территории [Unver, Taylor, 2012]



Рисунок 1.4 — Реконструкция исторических астрономических наблюдений с помощью виртуальной 3D-модели Стоунхенджа и окружающей территории (<http://wolkenkuckucksheim.de/>)

В последние годы были выполнены по меньшей мере два проекта по крупномасштабному лазерному сканированию исторических военных кораблей и гражданских судов (кораблей-музеев). В частности, в 2014 г. был частично отсканирован американский линкор «Нью-Джерси» (USS New

Jersey), который был спущен на воду в 1942 г., принимал участие во Второй мировой, Вьетнамской и других войнах, а с 2001 г. является кораблем-музеем [Angus, 2014]. Была отсканирована верхняя палуба, один из внутренних коридоров, одна из орудийных башен, часть корпуса снаружи, рисунок 1.5. Как отмечают авторы, «...это, по-видимому, первый крупномасштабный скан американского военного корабля» [Angus, 2014, p. 13].

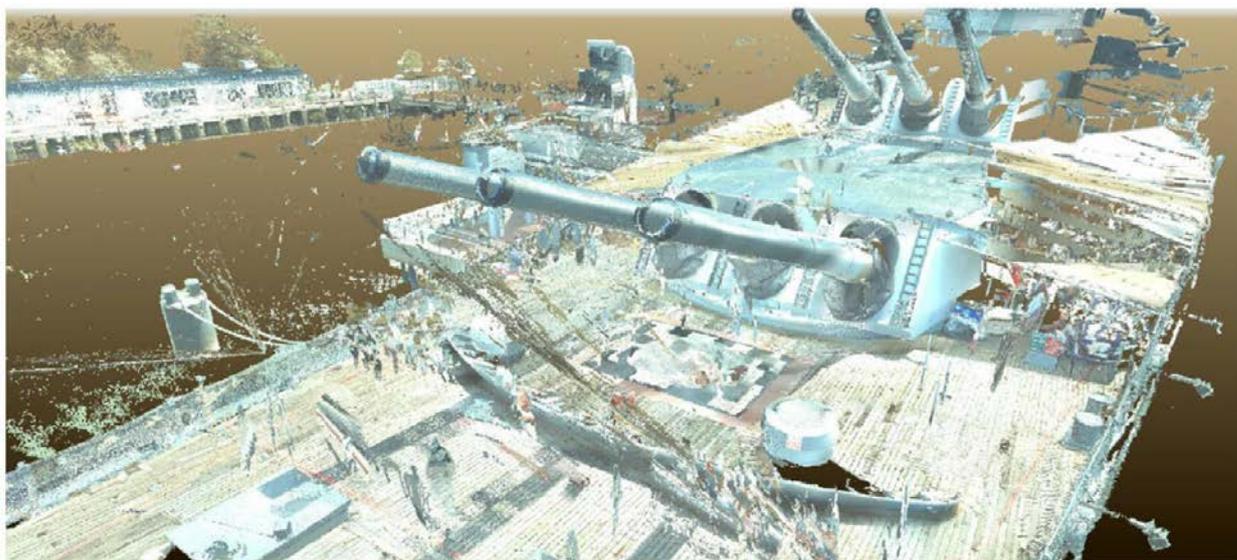


Рисунок 1.5 — Фрагмент точечной 3D-модели линкора «Нью-Джерси» (USS New Jersey) [Angus, 2014]

В 2013 г. было выполнено лазерное сканирование знаменитого судна «Дискавери» (RSS Discovery) [Urquhart, 2013], рисунки 1.6 и 1.7. Это последний в истории британского судостроения деревянный трехмачтовый барк, построенный в 1900-1901 гг. специально для Британской национальной антарктической экспедиции 1901-1904 гг. В настоящее время это судно принадлежит фонду Dundee Heritage Trust и является кораблем-музеем, его лазерное сканирование было выполнено компанией Digital Surveys по заказу фонда. Какие-либо технические параметры выполненного сканирования и параметры полученных трехмерных данных, к сожалению, в доступной литературе обнаружить не удалось.



Рисунок 1.6 — «Дискавери» (RSS Discovery). Слева – историческая фотография, 1902 г. [Mill, 1905]. Справа – точечная 3D-модель, результат лазерного сканирования, 2013 [Urquhart, 2013].

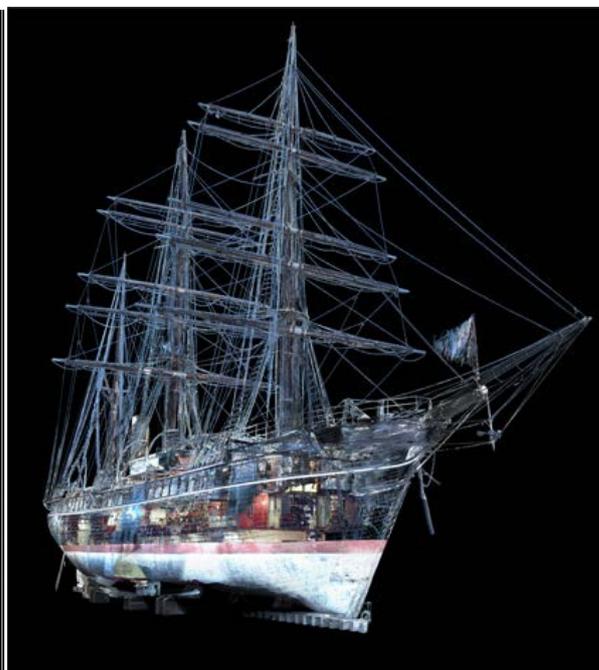


Рисунок 1.7 — «Дискавери» (RSS Discovery). Слева – современная фотография. Справа – точечная 3D-модель, результат лазерного сканирования, 2013. Фото из Интернета.

Информация о виртуальном 3D-моделировании некоторых исторических технических объектов доступна в Интернете, при этом научных публикаций об этих работах обнаружить не удалось. Например, известно о работе по лазерному сканированию и 3D-моделированию исторического локомотива Winifred (1885), рисунки 1.8-1.10.



Рисунок 1.8 — Локомотив Winifred. Историческая фотография. Фото из Интернета.



Рисунок 1.9 — Локомотив Winifred. Точечная 3D-модель (результат лазерного сканирования). Изображение из Интернета.

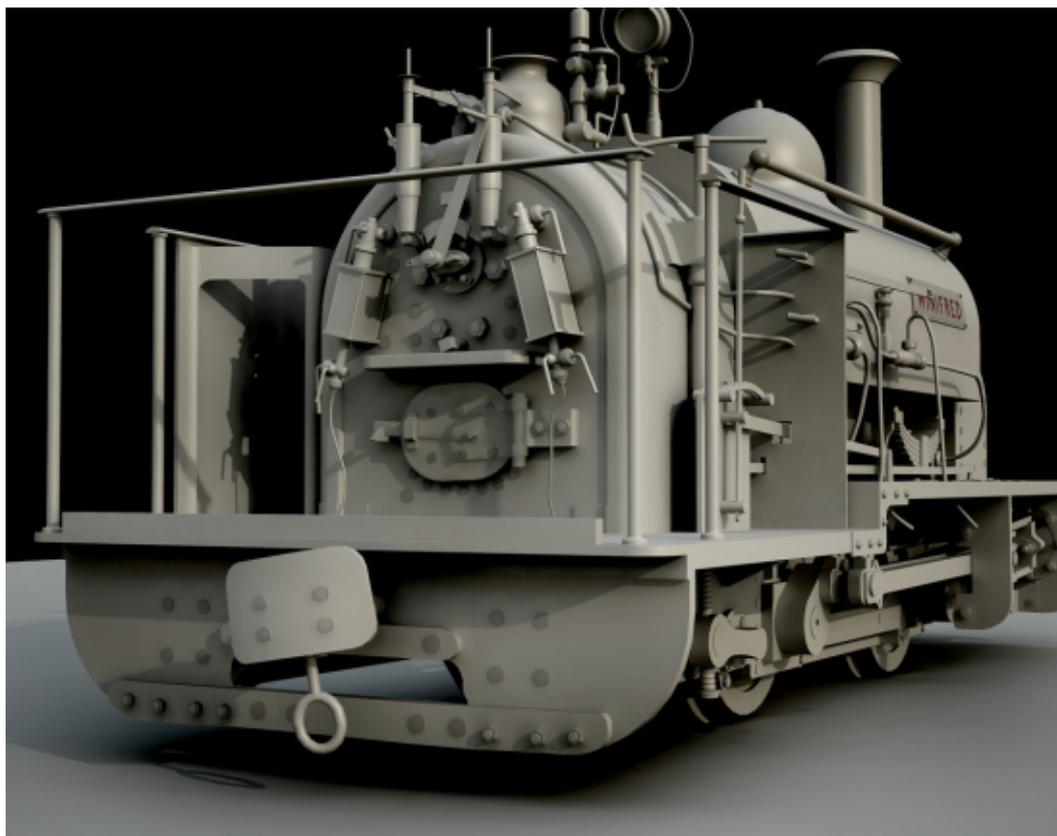


Рисунок 1.10 — Локомотив Winifred. Полигональная 3D-модель.
Изображение из Интернета.

Проекты по виртуальному 3D-моделированию и виртуальной 3D-реконструкции памятников техники выполняются и в России – как правило, силами отдельных энтузиастов или небольших коллективов.

Например, специалистами из Нижнего Тагила была выполнена виртуальная реконструкция и анимация воздуходушных мехов Нижнетагильского завода Демидова, основанная на детальном анализе исторической документации [Баранов, Кузовкова, 2013], рисунок 1.11. Студентом Тамбовского государственного университета им. Г. Р. Державина К. С. Кунавиным было выполнено 3D-моделирование вагона императорского поезда Александра III [Кунавин, 2013], рисунок 1.12. Сотрудниками ИИЕТ РАН было выполнено 3D-моделирование стропильных ферм перекрытия исторического здания Московского Манежа на основе сохранившихся иллюстраций А. А. Бетанкура [Егорова, Щербинин, 2013].

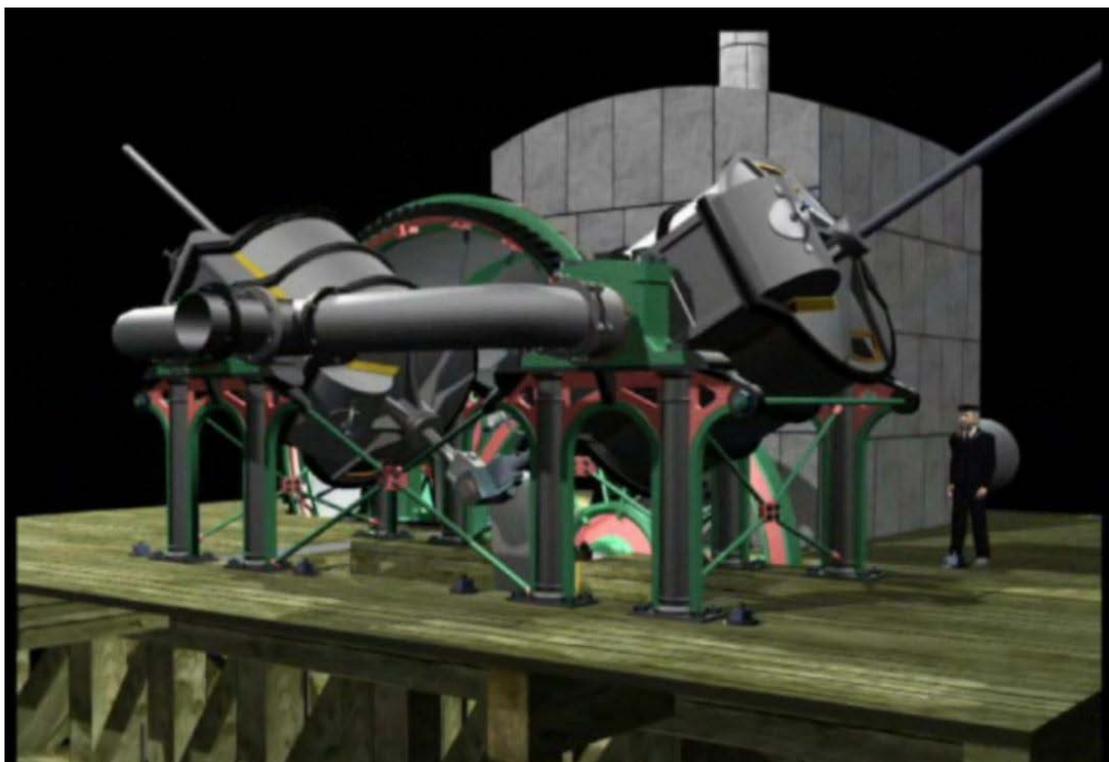


Рисунок 1.11 — Виртуальная 3D-реконструкция воздуходувных мехов Нижнетагильского завода Демидовых [Баранов, Кузовкова, 2013]

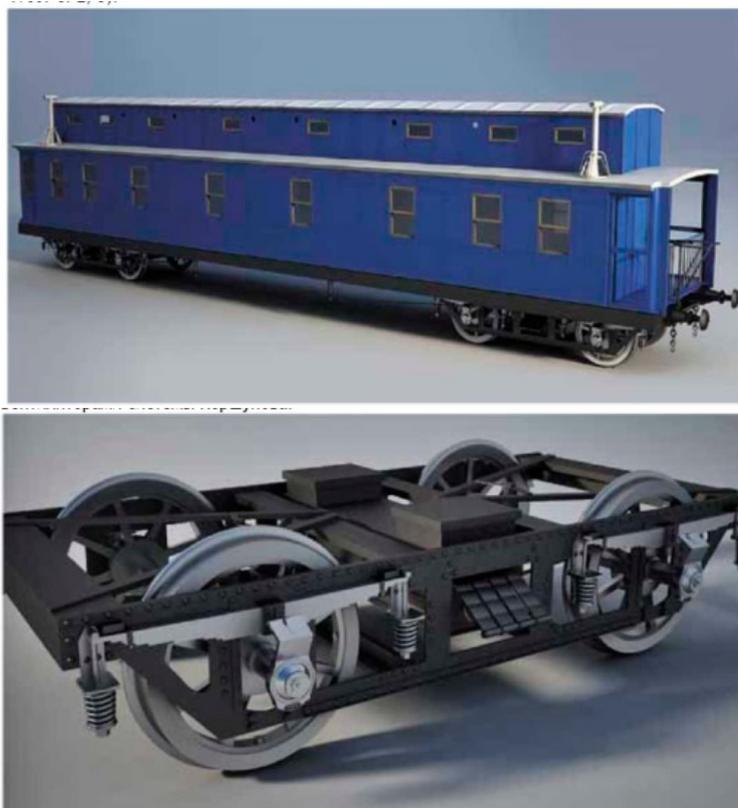


Рисунок 1.12 — 3D-модель вагона императорского поезда Александра III [Кунавин, 2013]

В лаборатории популяризации и пропаганды математики Математического института им. В. А. Стеклова был выполнен масштабный проект по цифровому 3D-моделированию и виртуальной 3D-реконструкции всех механизмов Чебышева, основанный на детальном анализе сохранившихся механизмов и исторической документации [Андреев и др., 2012а], рисунок 1.13. Там же была выполнена компьютерная 3D-реконструкция процесса постройки Шаболовской радиобашни в Москве, которая позволила обнаружить существенную ошибку в имевшихся до этого описаниях процесса постройки башни [Андреев и др., 2012б].

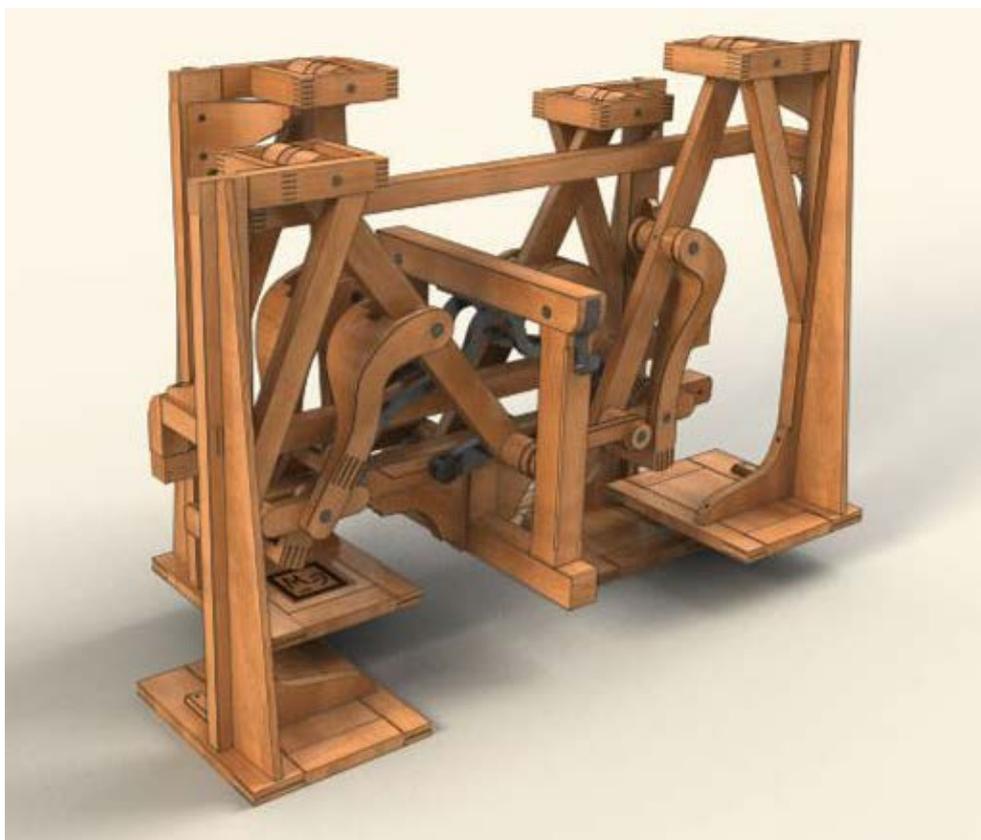


Рисунок 1.13 — Виртуальная 3D-реконструкция стопоходящей машины П. Л. Чебышева [Андреев и др., 2012а]

В 2010-2011 г. К. Гурьяновым была выполнена детальная и визуально реалистичная виртуальная 3D-реконструкция космического аппарата «Восток», включая как внешний вид, рисунок 1.14, так и интерьер. Права на 3D-модель были приобретены ИИЕТ РАН, и в последующем она использовалась для подготовки ряда юбилейных материалов к 50-летию

полета Ю. А. Гагарина (например, альбома «Академия наук и космос: к 50-летию полета Ю. А. Гагарина», <http://www.arran.ru/?q=ru/node/572>).

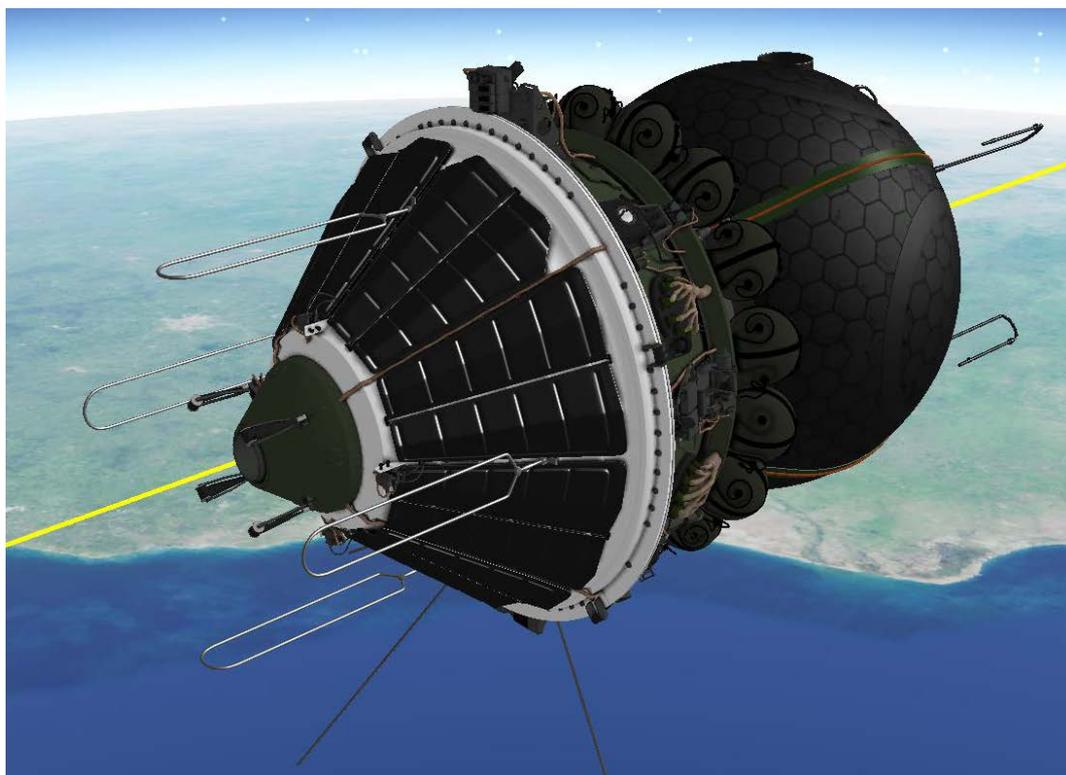


Рисунок 1.14 —Виртуальная 3D-реконструкция космического аппарата «Восток» (автор К. Гурьянов), в интерфейсе интерактивного приложения на основе виртуального глобуса (ИИЕТ РАН)

В Центре виртуальной истории науки и техники ИИЕТ РАН под руководством и при непосредственном участии автора в 2011-2015 гг. был создан ряд виртуальных 3D-моделей исторических технических объектов, в т. ч. виртуальная 3D-модель Шуховской башни на Шаболовке, виртуальная 3D-модель электромобиля «Колумбия» и др., которые будут подробно рассмотрены далее в настоящей работе.

К сожалению, практически все упомянутые выше виртуальные 3D-модели не доступны широкой публике, хотя они могли бы эффективно использоваться для популяризации истории науки и техники. В открытом доступе не удалось обнаружить ни одного виртуального музея на основе 3D-моделей или хотя бы связанного единым сценарием набора виртуальных 3D-экспонатов в области истории науки и техники.

Таким образом, выполненный анализ показывает, что тематика виртуального 3D-моделирования историко-технических объектов является слабо разработанной как в научных, так и в прикладных аспектах – не только в России, но и в мире в целом. При этом в рамках этой тематики можно выделить два наиболее сложных комплекса задач, разработка методов и технологий решения которых представляется наиболее актуальной:

1. 3D-моделирование крупномасштабных технических и природных объектов, в том числе в их историческом развитии, с учетом как исторической документации, так и современного состояния;

2. создание общедоступных 3D-презентаций для обеспечения свободного доступа к созданным виртуальным 3D-моделям и связанной с ними информации.

Рассмотрим проблематику указанных задач более подробно, т. к. именно они в первую очередь определяют направления настоящего исследования.

1.2 Основные проблемы в сфере 3D-моделирования объектов истории науки и техники

1.2.1 Проблема 3D-моделирования крупномасштабных объектов

Крупномасштабные объекты технического наследия отличаются от других типов культурного наследия тем, что значительно сложнее поддаются музеефикации. Крупные здания и сооружения, металлические и железобетонные конструкции, механизмы и транспортные средства, находящиеся на открытом воздухе и выведенные из эксплуатации, как правило, лишены постоянного обслуживания, со временем стареют и разрушаются. В то же время, приспособление этих объектов под современное использование, что позволяет продлить их жизнь, как правило, включает

внесение изменение в историческую конструкцию, демонтаж или замену оригинальных элементов, добавление новых деталей.

Исследователи проблемы сохранения индустриального наследия неоднократно отмечали, что использование крупномасштабных исторических технических объектов в новом качестве (и неизбежно необходимая при этом реконструкция) – зачастую единственный способ сохранить их, в том числе, и для выполнения музейных функций.

Например, крейсер «Аврора», обслуживанию которого в советское время уделялось значительное внимание, пережил неоднократные ремонты, демонтажи и замены артиллерийского вооружения, различных механизмов и внутренней обстановки. В ходе масштабного ремонта 1984-1987 гг. было заменено около половины корпуса и надстроек (в т.ч. отрезана и заменена вся подводная часть корабля, сняты паровые котлы), при этом на новом корпусе вместо заклепок применялась электросварка. Все это дало повод говорить о превращении «Авроры» в новодел. В 2014-2016 гг. крейсер пережил очередной масштабный ремонт. Восстанавливать его исторический облик изначально не планировалось, поскольку для этого потребовалось бы *«воссоздавать боевую рубку, строить два паровых спасательных катера, возводить батарейную палубу, ставить восемь 152-мм орудий, две паровые машины, три торпедных аппарата...»* [Волошин, 2013].

Шаболовская радиобашня, на протяжении десятков лет лишенная подобающего обслуживания, к настоящему времени находится в удручающем техническом состоянии. С другой стороны, лишь отсутствие обслуживания позволило «шуховской» несущей конструкции до сих пор сохраниться в своем оригинальном виде. Сравнивая по масштабу Эйфелева башня в Париже регулярно подвергается замене части металлических элементов; по некоторым оценкам, оригинальных металлических элементов в ней уже практически не осталось. Любой вариант реконструкции Шаболовской башни, необходимый для ее спасения, неизбежно будет включать замену части проржавевших оригинальных элементов, что

обязательно повлечет за собой и изменения в геометрии башни. В то же время, отсутствие обслуживания приведет к ее разрушению.

Таким образом, жизненный цикл крупномасштабного памятника техники, существующего достаточно долгое время, практически всегда включает постепенное изменение исторической конструкции, утерю оригинальных элементов и добавление новых. В связи с этим особую важность приобретает сохранение информации о состоянии конструкции на разных исторических этапах. Сохранение информации о памятнике техники – это не разовое действие, а постоянный процесс, которым необходимо заниматься точно так же, как и поддержанием его физической целостности и сохранности.

К традиционным способам сохранения информации об объектах долгое время относились описания, обмеры, зарисовки; в начале XX века к этому добавилось документальная фотография и киносъемка. В начале XXI века стали активно развиваться способы сохранения трехмерной информации: лазерное сканирование и фотограмметрия, в том числе, с использованием «структурированного света». В отличие от двумерного чертежа или фотографии, эти методы позволяют сохранить геометрическую информацию об объекте в некоторой трехмерной системе координат, связанной с объектом. Это принципиально отличает трехмерные модели от двумерных изображений [Леонов, Батулин, 2013].

Для объектов небольшого масштаба, в частности, музейных экспонатов, расположенных в закрытых помещениях, могут применяться различные методы сохранения трехмерной информации. Для крупномасштабных технических объектов, архитектурных сооружений, расположенных на открытом воздухе, единственным эффективным способом фиксации трехмерной геометрии с высокой точностью и детализацией является лазерное сканирование с применением современных промышленных лазерных сканеров.

Преимущества лазерного сканирования, необходимость его применения для сохранения информации о памятниках техники, особенно крупномасштабных, очевидны все большему кругу специалистов. В то же время, применение лазерного сканирования и 3D-моделирования для сохранения и изучения памятников техники имеет свою специфику, которая отличается от типовых промышленных задач. В случае памятника техники, требуется проведение детального историко-технического анализа всего доступного массива архивной документации, определение и обоснование требуемой метрической точности и детальности (подробности) моделирования разных частей и элементов объекта (которые могут существенно различаться в зависимости от поставленных задач по сохранению и изучению объекта), индивидуальная оптимизация методик 3D-моделирования в зависимости как от специфики объекта, так и от будущих задач визуализации и презентации созданных 3D-моделей и т. д.

Именно поэтому анализ возможностей применения новых 3D-технологий для сохранения информации о крупномасштабных памятниках техники, апробация разработанных методов и технологий стали приоритетной целью Центра виртуальной истории науки и техники ИИЕТ РАН с момента его создания в 2011 г. В 2011-2013 гг. под руководством и при непосредственном участии автора был выполнен проект по лазерному сканированию и трехмерному моделированию крупного технического объекта – Шаболовской радиобашни [Leonov et al., 2015], рисунок 1.15. Созданная цифровая 3D-модель может использоваться для контроля качества реставрации и реконструкции, а также для воссоздания башни в случае ее утраты. Кроме того, на основе созданной 3D-модели было разработано общедоступное интернет-приложение, которое позволяет виртуально «путешествовать» по модели башни и изучать ее конструкцию, а также показывает основные этапы развития конструкции башни со временем.

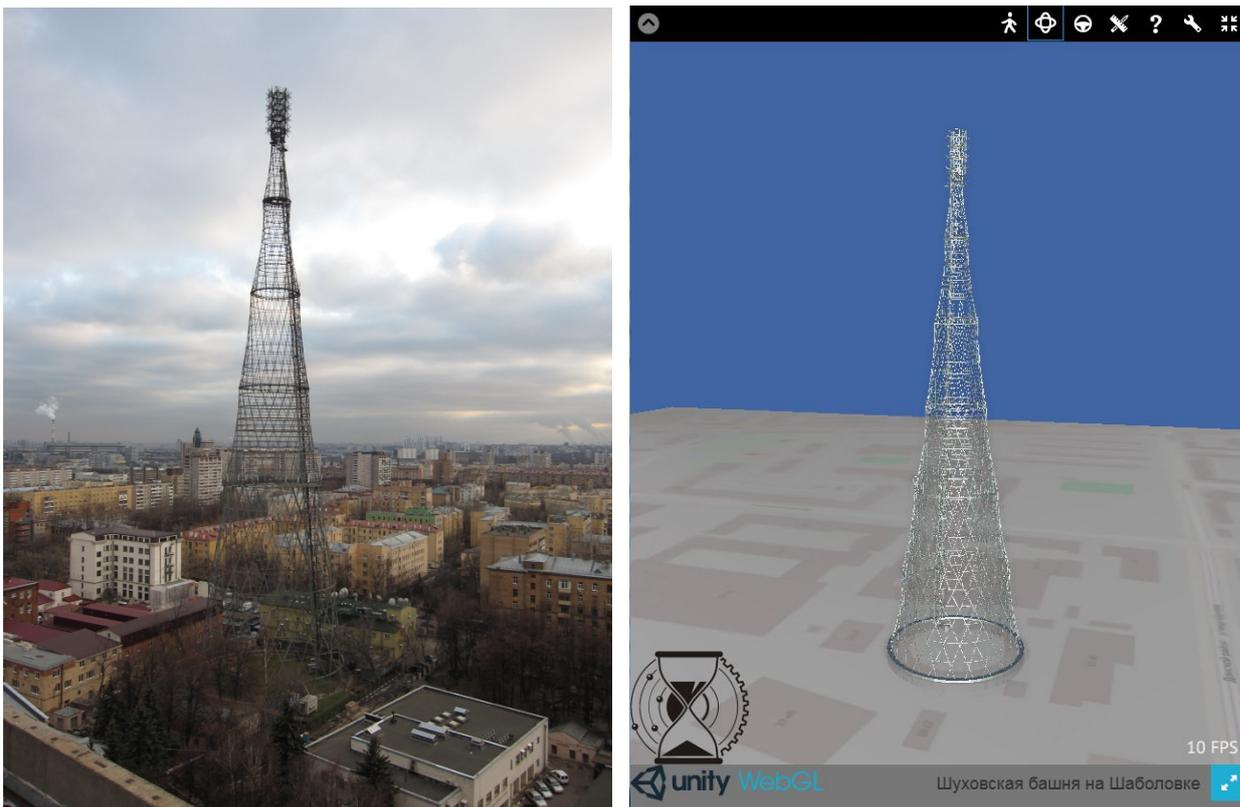


Рисунок 1.15 – Шаболовская радиобашня, фотография автора, 2011 г. (слева), виртуальная 3D-модель башни в интерфейсе общедоступного веб-приложения на сайте ИИЕТ РАН, 2016 г. (справа).

Впоследствии наработанный опыт был применен также и в других проектах. В частности, было выполнено сохранение трехмерной информации о крейсере «Аврора» и скульптуре «Родина-Мать зовет!» — крупных технических объектах, которые, как и Шаболовская башня, являются крупномасштабными памятниками техники и общеизвестными символами советского периода нашей истории.

Не менее сложной задачей, чем 3D-моделирование крупных технических объектов, является 3D-моделирование природных территорий, особенно в тех случаях, когда стоит задача выполнения такого моделирования с высокой точностью и детализацией для достаточно крупной территории. Как будет показано в данной работе, такое 3D-моделирование в некоторых случаях может быть эффективным инструментом решения

историко-научных задач, например, реконструкции истории изучения природного объекта и анализа исторической документации, схем и карт.

Примеры виртуального 3D-моделирования крупномасштабных технических и природных объектов и анализ разработанных для этого методов и технологий будут приведены в главе 2 настоящего исследования.

1.2.2 Проблема общедоступного представления 3D-моделей

Как показывает выполненный анализ мирового и российского опыта, проблема общедоступного представления виртуальных 3D-моделей является еще более острой, чем проблема создания таких моделей. Несмотря на доступную информацию о ряде проектов в области 3D-моделирования объектов истории науки и техники, созданные 3D-модели, как правило, не доступны для просмотра и изучения широкой публике – несмотря на их очевидную ценность как для исследовательских задач, так и для задач популяризации науки и техники. Как представляется, основной причиной этого является техническая сложность визуализации крупных и детальных виртуальных 3D-моделей средствами веб-браузера, а также сложность организации интуитивно понятного интерфейса для самостоятельного взаимодействия пользователя с такими 3D-моделями. Эти сложности не преодолены удовлетворительно до сих пор.

С технологической точки зрения, для представления виртуальных 3D-моделей (и потенциально для реализации виртуального музея на основе 3D-моделей) могут применяться два подхода: индивидуализированный или массовый [Леонов, 2014д].

Индивидуализированный подход предполагает использование стационарного или мобильного программно-аппаратного комплекса, как правило с большим экраном, зачастую с поддержкой специфических функций отображения (например, стерео) или взаимодействия (сенсорные экраны, манипуляторы). При этом может подразумеваться либо непосредственное взаимодействие пользователя (зрителя) с данным

комплексом, либо наличие оператора, осуществляющего демонстрацию. Индивидуальное взаимодействие пользователя с комплексом более характерно для виртуальных тренажеров, музейные же применения чаще рассчитаны на экскурсионную группу, для которой демонстрацию осуществляет специально обученный оператор. Программное обеспечение для таких комплексов разрабатывается с учетом индивидуальных технических особенностей используемого оборудования и не может быть перенесено на другой аппаратный комплекс (или в Интернет) без значительной переработки.

Массовый подход предполагает создание автономного программного продукта, который можно установить на пользовательском компьютере, либо создание веб-приложения, предназначенного для просмотра с использованием браузера. В обоих случаях, предполагается самостоятельное взаимодействие пользователя с программным продуктом, без возможности обратиться к помощи оператора. Веб-приложение, в свою очередь, может быть реализовано в двух вариантах: в варианте, требующем установки плагина (например, на основе Unity3D), или в варианте, работающем непосредственно в веб-браузере (например, на основе WebGL). Безусловно, наиболее массовый доступ к виртуальной 3D-модели может быть обеспечен посредством веб-приложения, не требующего установки плагина.

Реализация веб-приложений, обеспечивающих интерактивную демонстрацию 3D-моделей, долгие годы сдерживалась отсутствием единого стандарта (технологии) представления 3D-графики для браузеров. В 2011 г. была представлена спецификация WebGL, которая в течение нескольких лет была поддержана почти всеми популярными браузерами: Mozilla Firefox, Google Chrome, Safari, Opera. В ноябре 2013 г., наконец, поддержка WebGL была реализована и в наиболее массовом браузере Internet Explorer. Официальный релиз Internet Explorer 11 с поддержкой WebGL вышел 7 ноября 2013 г., таким образом, WebGL стал де-факто стандартом представления 3D-графики в Интернете без использования плагина.

Эксперименты с применением WebGL для обеспечения доступа к виртуальным 3D-моделям и реализации виртуального музея ведут многие организации. Наиболее ярким примером является проект Smithsonian X 3D Смитсоновского института (США) [Cheves, 2014], доступный в Интернете по адресу: <https://3d.si.edu>. Проект посвящен оцифровке наиболее интересных экспонатов, доступных в коллекциях Смитсоновского института, и общедоступному представлению созданных виртуальных 3D-моделей и связанной с ними информации в Интернете. Для просмотра виртуальных 3D-моделей (3D-документов) на сайте Смитсоновского института используется специальный плагин для браузера на основе WebGL, разработанный компанией Autodesk. Интересно отметить, что проект Smithsonian X 3D был представлен широкой публике 13 ноября 2013 г. – т. е., очевидно, приурочен к официальному выходу Internet Explorer 11.

Программа Smithsonian X 3D включает, в том числе, и памятники техники – например, самолет братьев Райт и другие историко-технические экспонаты. Примеры виртуальных 3D-моделей технических объектов, представленных на сайте Смитсоновского института в рамках проекта «Smithsonian X 3D», приведены на рисунки 1.16 и 1.17.

Отметим, что разработка качественных веб-приложений требует привлечения соответствующих специалистов. Не случайно даже такая финансово обеспеченная организация, как Смитсоновский институт, не пошла по пути самостоятельного создания программного обеспечения, а привлекла для разработки веб-приложения компанию Autodesk – признанного мирового лидера в области трехмерных систем автоматизированного проектирования (САПР). Очевидно, что для создания качественных 3D-демонстраций (и в перспективе – виртуального музея науки и техники) необходима тесная кооперация и взаимодействие между научными организациями, профильными музеями и коммерческими компаниями, которые обладают штатом квалифицированных инженеров и программистов-разработчиков.

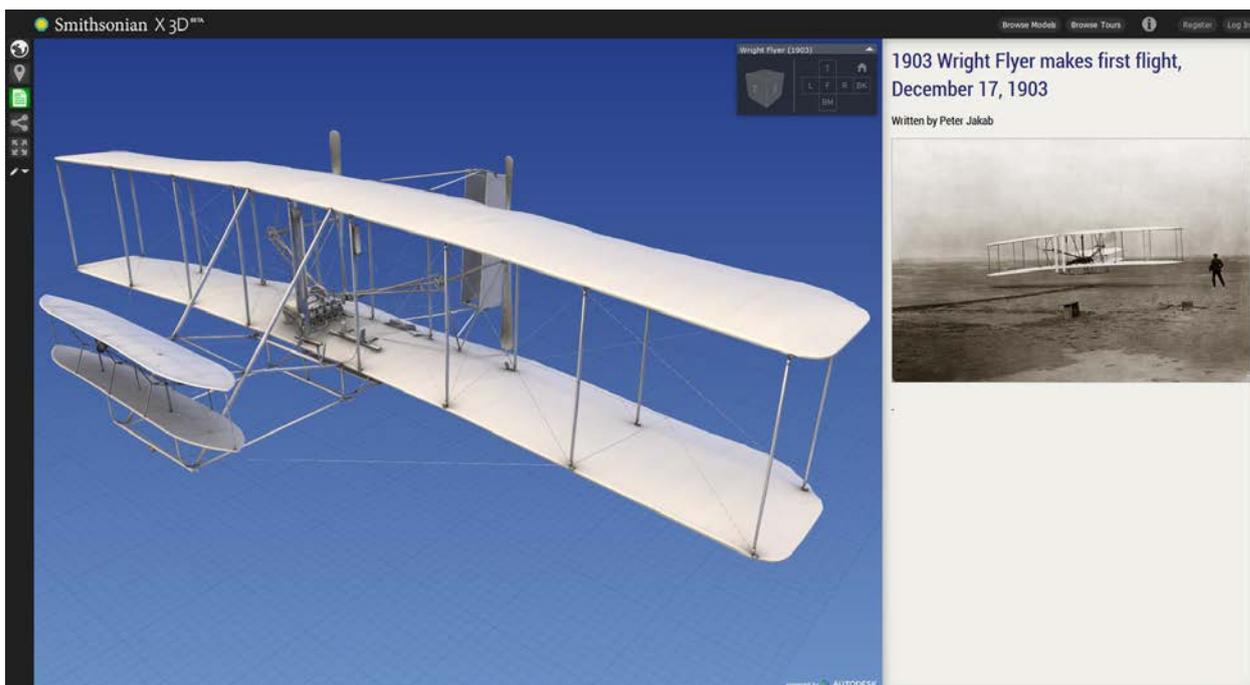


Рисунок 1.16 — Интерактивная полигональная 3D-модель самолета братьев Райт на сайте Смитсоновского института (проект Smithsonian X 3D), справа для сравнения представлена историческая фотография

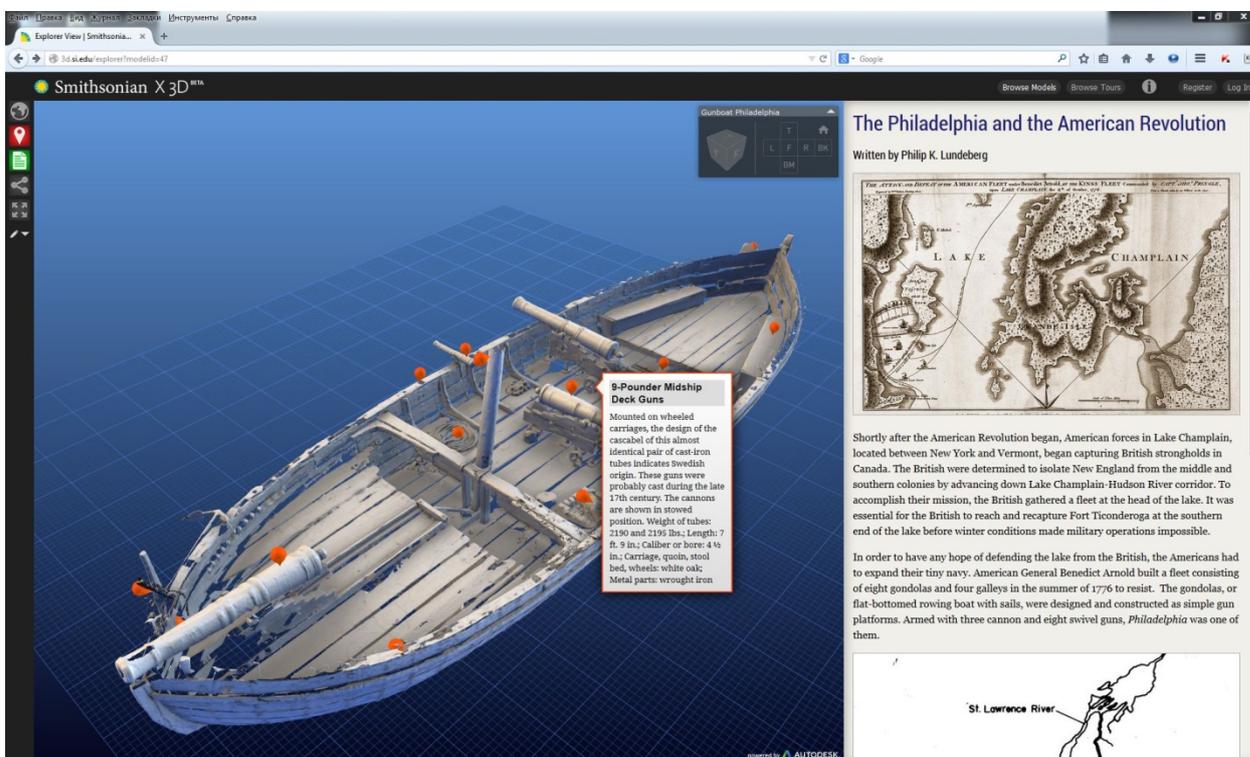


Рисунок 1.17 — Интерактивная точечная 3D-модель канонерской лодки Филадельфия (1776) на сайте Смитсоновского института (проект Smithsonian X 3D)

Таким образом, следует подчеркнуть, что работа по созданию веб-приложений для демонстрации виртуальных 3D-моделей широкой публике, и тем более по созданию виртуальных музеев на основе виртуальных 3D-моделей, находится сегодня в своей начальной стадии. В лучшем случае, речь идет о коллекциях виртуальных трехмерных экспонатов, как в проекте Smithsonian X 3D. Но гораздо чаще это отдельные виртуальные реконструкции, причем, как правило, выполненные в форме автономных приложений без возможности веб-доступа. В то же время, современный технологический потенциал, имеющиеся технические и методические наработки, а главное – выраженный интерес к данной тематике со стороны ведущих музеев мира позволяют надеяться на ее быстрое развитие.

Примеры 3D-приложений, созданных для представления виртуальных 3D-моделей крупномасштабных технических и природных объектов, и анализ разработанных для этого подходов будут приведены в главе 3 настоящего исследования.

1.3 Анализ терминологии и определение понятия «виртуальный»

Как было отмечено на первой странице введения, в данной работе термины «виртуальный» и «цифровой» употребляются как синонимы. Данное решение не является самоочевидным, в связи с чем представляется необходимым провести подробный анализ применяемой терминологии.

Спектр значений английского слова «virtual» настолько широк, что некоторые из них имеют прямо противоположный смысл. Например, англо-русский словарь Мультитран (<http://www.multitran.ru>) приводит такие значения, как «возможный, гипотетический, кажущийся, мнимый», и в то же время – «действительный, фактический, истинный, текущий» (ср. англ. *virtually* – «в действительности, на самом деле, фактически»). Соответственно, слово «виртуальный» может нести разную смысловую нагрузку в зависимости от той ситуации, в которой оно употребляется. Поэтому, прежде чем применять это понятие в профессиональной

терминологии, например, в таких сочетаниях, как «виртуальное 3D-моделирование», «виртуальная история науки и техники» или «виртуальный музей», необходимо определить, какое значение ему придается.

Отметим, что необходимость анализа и упорядочения понятийного аппарата, связанного со словом «виртуальный», осознается многими специалистами. Например, вопросы определения понятия «виртуальный музей» и систематизации связанной с ним терминологии были недавно рассмотрены в работе специалистов Государственного Эрмитажа и ГМИИ им. А. С. Пушкина [Гук, Определенов, 2014].

Этимология английского прилагательного *virtual* восходит к лат. *vir* (мужчина) и *virtus* (доблесть). Англ. *virtue* обладает множеством значений, включая «добродетель, достоинство, целомудрие, свойство, сила, действие» (ср. виртуозный). Вероятно, этим и определяется столь широкий спектр современных смыслов слова *virtual*. С XV в. английским этимологическим словарем (<http://www.etymonline.com>) фиксируются такие оттенки значения, как «способный производить определенный эффект» (ср. лат. *virilitas* – «мужественность, половая потенция»; рус. вирильность); «существующий по сути или по эффекту, но не фактически». Например, в оптике: *virtual focus*, *virtual image* исторически переводится как «мнимый фокус», «мнимое изображение».

С развитием компьютерных технологий в XX веке термин «виртуальный» получил ряд новых, узких значений:

1. Реализованный с помощью программного обеспечения, а не аппаратно (например, «виртуальный дисковод»). Синоним: логический. Антоним: физический.

2. Осуществляемый через Интернет, а не лично (например, «виртуальное общение», «развиртуализироваться» – т. е. познакомиться лично с человеком, которого до этого знал только по общению в Интернете). Синоним: сетевой. Антоним: личный.

3. Симулированный посредством искусственного воздействия на органы чувств («виртуальная реальность»). Синоним: иллюзорный. Антоним: настоящий.

Применение указанных компьютерных технологий в традиционных областях (таких, как археология, музейная деятельность или историческая наука) привело к появлению новых, недостижимых ранее возможностей, прежде всего – связанных с формированием образа объекта в воображении человека без взаимодействия с реальным объектом. Именно с этим связано возникновение таких терминов, как «виртуальная археология», «виртуальный музей», «виртуальная история науки и техники». При этом понятие «виртуальный» можно относить как к самому образу, так и к тем техническим средствам, которые обеспечивают его формирование (например, компьютерному файлу или программе) [Леонов, 2015г].

Легенда гласит, что на первых показах фильма братьев Люмьер «Прибытие поезда на вокзал Ла-Сьота» в 1896 году люди в страхе вскакивали с мест и разбегались в стороны при виде паровоза, стремительно «приближавшегося» на киноэкране. Плоская в реальности картинка, сформированная с помощью передовой на тот момент технологии синематографа, вызывала в сознании неискушенных зрителей столь реалистичное ощущение приближающегося поезда, что они путали эту картинку с реальным движущимся объектом.

Было ли это на самом деле или нет – доподлинно неизвестно. Но если это и легенда, то весьма правдоподобная. Так устроено сознание: человек воспринимает мир через органы чувств, которые можно «обмануть». Если на сенсорные каналы человека (зрение, слух, осязание и др.) подать сигналы, напоминающие сигналы от реального объекта – то мозг сформирует в сознании образ этого объекта. Этот образ называют виртуальным.

За сотню лет, прошедших со времени изобретения кинематографа, технологии создания виртуальных образов существенно продвинулись – прежде всего, благодаря развитию компьютерной техники. Теперь для этого

используют не киноплёнку и киноаппарат, а компьютерные файлы – цифровые трехмерные модели и программы, обеспечивающие их отображение. Эти 3D-модели также иногда называют виртуальными, подчеркивая тем самым, что они вызывают формирование виртуального образа в сознании человека.

«Я разрабатываю виртуальную модель», — скажет специалист по компьютерной графике, рисуящий на компьютере цифровую трехмерную модель космической станции. «И я разрабатываю виртуальную модель», — скажет программист, который пишет код программы, обеспечивающей отображение этой модели космической станции на экране компьютера и взаимодействие пользователя с ним. «А я путешествую по виртуальной модели», — скажет пользователь, запустивший программу на своем компьютере и рассматривающий трехмерную модель космической станции на экране. Он путешествует, конечно, не по ноликам и единицам компьютерного файла, и не по списку файлов в компьютерной директории, а по виртуальному образу в своем сознании.

Важное отличие компьютерных виртуальных образов от кинематографических заключается в том, что их можно сделать интерактивными, то есть реагирующими на действия зрителя (пользователя). Фильм можно только смотреть; виртуальной 3D-моделью на экране компьютера можно управлять (например, вращать, приближать и т. п.)

В большинстве ситуаций человек в той или иной степени осознает разницу между образом реального объекта и виртуальным образом, сформированным искусственно. Для описания того, насколько близко восприятие человеком виртуального образа к восприятию реального объекта, используется понятие «степени погружения».

Например, представьте, что на экране компьютера отображается летящая в зрителя стрела. Будет ли он уворачиваться? Если речь идет о фотографии или видео — то, конечно, вряд ли. А если этот образ сгенерирован компьютерной игрой, в которую играют в наушниках в темной

комнате, глубоко погрузившись в воображаемый мир и забыв о реальности? Глубина погружения зависит от многих факторов: и от того, насколько успешно заблокированы сигналы из реального мира, и от полноты охвата различных сенсорных каналов человека (визуального, звукового, тактильного и др.) симулированными воздействиями, и от длительности нахождения человека в виртуальном пространстве, и от степени заинтересованности в происходящем, и от новизны ощущений.

В наиболее современных системах для формирования виртуальных образов применяется целый комплекс технологий для одновременного воздействия на разные органы чувств: стереоскопические экраны, системы трекинга (т. е. отслеживания положения зрителя и отдельных частей его тела – головы, глаз, конечностей), тактильные устройства, силовые установки с обратной связью, многоканальное звуковое сопровождение. Такие системы получили название систем «виртуальной реальности».

«Визитная карточка» систем виртуальной реальности — стереоскопическое отображение виртуальной сцены, когда для каждого глаза зрителя формируется свое изображение (и изображения для разных глаз, как и в реальной жизни, отличаются). Такой обман зрения приводит к тому, что человек видит (а точнее — мозг человека формирует в сознании) объемное изображение, что может заметно усилить эффект воздействия виртуального образа. Технические способы для создания стереоскопического эффекта многообразны: например, затворные очки, очки с различными типами светофильтров (анаглифные, поляризационные, хроматические), безочковые стерео-экраны на основе параллаксного барьера и др. Считается, что стереоскопические системы виртуальной реальности обеспечивают максимальный «эффект погружения». Впрочем, у них есть и свои недостатки: у многих людей от длительного просмотра стереоскопического изображения, тем более интерактивного, устают глаза, начинает болеть или кружиться голова.

Так или иначе, виртуальные образы, сгенерированные компьютером, впечатляют даже без использования стереоэффекта.

Таким образом, мы приходим к двум возможным определениям термина «виртуальный» в нашей профессиональной области:

1. Виртуальный — возникающий в воображении человека за счет искусственного воздействия на органы чувств, сформированного с использованием компьютерной техники (ср. «путешествие по виртуальной модели»);

2. Виртуальный — реализованный в компьютерном формате (файл, программа и т.п.) и обеспечивающий формирование образа объекта в воображении человека без взаимодействия с реальным объектом (ср. «разработка виртуальной модели»).

По сути, эти определения эквивалентны. Мы рассматриваем только те образы, которые сформированы с использованием компьютерных технологий; и нас интересуют только те технологии, которые ведут к формированию виртуальных образов.

В рамках данной работы, мы будем называть «виртуальной 3D-моделью» любой трехмерный цифровой объект (информацию, зафиксированную на материальном носителе в цифровой электронной форме в привязке к трехмерной системе координат), который при его воспроизведении (или выполнении) с использованием современной компьютерной техники обеспечивает формирование образа объекта в воображении человека без взаимодействия с реальным объектом. Сам этот образ, формируемый в воображении человека, мы также будем называть «виртуальным».

Внедрение современных компьютерных технологий в музейную деятельность привело к возникновению такого термина, как «виртуальный музей». Первые виртуальные музеи, описанные в литературе более 20 лет назад, были основаны на таких технологиях, как детальная фотосъемка (например, картин), оцифровка (сканирование) документов, и обеспечение

доступа к полученным массивам данных через Интернет. Постепенно на первый план вышли новые технологии фиксации трехмерной информации (лазерное сканирование, фотограмметрия, томография и др.), которые позволяют создать точную и детальную 3D-модель объекта. Принципиальное отличие такой 3D-модели от двумерных образов (чертежей, фотографий) состоит в том, что вся информация об объекте сохраняется в некоторой трехмерной системе координат, связанной с этим объектом. Именно это позволяет рассматривать цифровые 3D-модели как принципиально новый способ сохранения информации об объектах и формирования их виртуальных образов, а виртуальный музей на основе виртуальных 3D-моделей – как новый вид музея.

Информация о музейных объектах, памятниках культуры и природы сегодня может быть надежно сохранена для будущих поколений не только в форме описаний, чертежей, фотографий и видеосъемок, но и в формате цифровых трехмерных моделей, которые с высокой точностью передают геометрию, текстуру, структуру объектов. Для просмотра таких 3D-моделей не нужно идти в музей – их можно посмотреть в любое удобное время через Интернет на собственном компьютере, планшете, смартфоне. Если музейный экспонат поломан, неисправен, утрачен – в виртуальной 3D-модели его можно реставрировать, реконструировать, или полностью воссоздать утраченный объект по чертежам и фотографиям. В виртуальной 3D-модели также можно легко реализовать просмотр внутреннего устройства технического объекта и анимацию его работы.

Необходимо подчеркнуть, что способы формирования виртуальных образов меняются со временем, и «компьютерная» виртуальная реальность является лишь очередным этапом их развития. Для иллюстрации можно вспомнить те же легенды о первых показах фильмов братьев Люмьер, или основанный на этих легендах эпизод из к/ф «Человек с бульвара Капуцинов», где ковбои, впервые увидевшие кино, начинают разбегаться в разные стороны и стрелять в экран, когда на нем появляется приближающийся

поезд. Это, возможно, художественное преувеличение – но не такое большое, как может показаться на первый взгляд. Вполне вероятно, что в начале XX века виртуальные образы, сформированные посредством кинематографа, производили не меньшее воздействие на неискушенного зрителя, чем современная «компьютерная» виртуальная реальность.

Таким образом, задачи виртуальной истории науки и техники или виртуального музея не сводятся лишь к трехмерному цифровому моделированию и созданию интерактивных приложений для систем виртуальной реальности. Определение «виртуального» может трактоваться (и зачастую трактуется) намного шире, включая, в том числе, обычную цифровую фото- и видеосъемку или организацию веб-доступа к базам данных. Однако именно новые технологии фиксации информации (3D-документирование) и симуляции реальности (виртуальная реальность) обеспечили возможность создания виртуальных образов принципиально нового типа [Леонов, Батурин, 2013]. Это позволяет рассматривать виртуальную историю науки и техники как новое научное направление [Леонов, 2014в], а виртуальный музей – как новый вид музея, никоим образом не эквивалентный веб-сайту музея [Леонов, 2015г].

1.4 Выводы по главе 1

Применение 3D-технологий для задач истории науки и техники находится в начальной стадии. Тематика виртуального 3D-моделирования историко-технических объектов является слабо разработанной как в научных, так и в прикладных аспектах – не только в России, но и в мире в целом. Отдельные проекты в этой области выполняются разрозненными научными группами и индивидуальными исследователями. При этом виртуальное 3D-моделирование имеет большой потенциал для историко-научного и историко-технического исследования технических и природных объектов, сохранения информации об объектах и их популяризации.

Можно выделить два наиболее сложных комплекса задач, связанных с виртуальным 3D-моделированием историко-технических объектов:

1. 3D-моделирование крупномасштабных технических и природных объектов, в том числе в их историческом развитии, с учетом как исторической документации, так и современного состояния;

2. создание общедоступных 3D-презентаций для обеспечения свободного доступа к созданным виртуальным 3D-моделям и связанной с ними информации.

Именно эти задачи в первую очередь определяют направления настоящего исследования.

Применение лазерного сканирования и 3D-моделирования для сохранения и изучения памятников техники имеет свою специфику. Требуется проведение детального историко-технического анализа всего доступного массива архивной документации, определение и обоснование требуемой метрической точности и детальности (подробности) моделирования разных частей и элементов объекта (которые могут существенно различаться в зависимости от поставленных задач по сохранению и изучению объекта), индивидуальная оптимизация методик 3D-моделирования в зависимости как от специфики объекта, так и от будущих задач визуализации и презентации созданных 3D-моделей и т. д. Не менее сложной задачей, чем 3D-моделирование крупных технических объектов, является 3D-моделирование природных территорий, особенно в тех случаях, когда стоит задача выполнения такого моделирования с высокой точностью и детализацией для достаточно крупной территории.

Проблема общедоступного представления виртуальных 3D-моделей является еще более острой, чем проблема создания таких моделей. Несмотря на доступную информацию о ряде проектов в области 3D-моделирования объектов истории науки и техники, созданные 3D-модели, как правило, не доступны для просмотра и изучения широкой публике – несмотря на очевидную их ценность как для исследовательских задач, так и для задач

популяризации науки и техники. Как представляется, основной причиной этого является техническая сложность визуализации крупных и сложных виртуальных 3D-моделей средствами веб-браузера, а также сложность организации интуитивно понятного интерфейса для самостоятельного взаимодействия пользователя со сложными виртуальными 3D-моделями.

Отдельно следует отметить, что спектр значения слова «виртуальный» является очень широким, и для целей данной работы его необходимо сузить и четко определить.

В рамках данной работы, мы будем называть «виртуальной 3D-моделью» любой трехмерный цифровой объект (информацию, зафиксированную на материальном носителе в цифровой электронной форме в привязке к трехмерной системе координат), который при его воспроизведении (или выполнении) с использованием современной компьютерной техники обеспечивает формирование образа объекта в воображении человека без взаимодействия с реальным объектом. Сам этот образ, формируемый в воображении человека, мы также будем называть «виртуальным».

Глава 2. РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ВИРТУАЛЬНОМУ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЮ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ ИСТОРИИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

2.1 Виртуальное 3D-моделирование крупномасштабного технического объекта: на примере Шуховской башни на Шаболовке

Радиобашня на Шаболовке – символ советского радио- и телевидения, всемирно известный памятник архитектуры русского авангарда [Шухов..., 1995]. Ее также называют Шуховской башней, по имени ее создателя – выдающегося русского инженера, члена-корреспондента и почетного члена Академии наук СССР Владимира Григорьевича Шухова (1853-1939). Башня была построена в 1919-1922 гг., трансляция радиопередач началась 19 марта 1922 г. В 1937-1967 гг. башня использовалась также для телевидения.

Башня состоит из шести гиперболоидных секций, которые в данной работе нумеруются снизу вверх арабскими цифрами (1-6), и надстройки. Оригинальная надстройка 1922 г. была реконструирована в 1937 г., а в 1991 г. демонтирована и заменена на новую, которая в свою очередь также была демонтирована в 2015 г.

Каждая гиперболоидная секция состоит из прямолинейных ног, которые расположены по образующим гиперболоида, и горизонтальных кольцевых ферм, расположенных на стыках секций. Каждая ферма состоит из двух колец (внешнего и внутреннего) и обрешетки между ними. Ноги смежных секций пропущены между кольцами фермы и крепятся к ним и друг к другу через фасонки. Конструкция соединительных узлов различается для разных секций. Кроме того, в каждой секции есть промежуточные кольца жесткости, которые крепятся к ногам изнутри. В четырех нижних секциях по 48 ног, в двух верхних секциях – по 24 ноги. В двух нижних секциях каждая нога составлена из двух швеллеров, расположенных стенками друг к другу, в четырех верхних секциях – из уголков различного профиля.

Капитальный ремонт башни не проводился ни разу за время ее существования. «Шуховская» несущая конструкция (шесть гиперболоидных секций) сохранилась до сегодняшнего дня практически в первоначальном виде. В 1937, 1947, 1971-1973, 1991 гг. выполнялись реконструкции башни, в ходе которых на ней был установлен ряд дополнительных элементов: технологические платформы на разных уровнях и ферма для подводки фидеров (1937 г.), дополнительные промежуточные кольца жесткости (1973 г.), новая надстройка для крепления антенн УКВ-ЧМ (1991 г.), грузопассажирский электрический лифт, антенны сотовой связи и др. В 2013 г. антенны сотовой связи были демонтированы, в 2015 г. была также демонтирована надстройка для крепления антенн УКВ-ЧМ и некоторые технологические платформы.

2.1.1 Мотивация выполнения работы

Коррозия стальных конструкций башни достигла угрожающего уровня уже в 1991 г., когда при подготовке проекта новой надстройки для установки антенн УКВ-ЧМ была обнаружена щелевая коррозия элементов башни и отмечена необходимость безотлагательного обследования и ремонта башни [Архив ЦНИИПСК, 1991]. Однако государственные средства на реставрацию были выделены только в 2011 г. Техническое состояние несущих конструкций башни к этому моменту уже характеризовалось как недопустимое, которое в любой момент может перейти в аварийное [Гранев и др., 2012]. Было представлено несколько проектов реставрации башни [Петропавловская, 2011], подразумевающие существенное вмешательство в конструкцию башни, в том числе ее частичный демонтаж. Например, проектная документация, подготовленная ООО «Качество и надежность» в 2011 г., подразумевала приведение башни к первоначальному виду 1922 г. (в итоге этот проект и был принят для реализации). По этому проекту, в частности, планируется демонтировать и спустить на землю для реставрации две верхние гиперболоидные секции башни, а затем смонтировать их заново.

В 2011 г. стала очевидна неизбежность скорого проведения масштабных реставрационных работ на башне. В связи с этим, а также в связи с 90-летним юбилеем башни в 2012 г. и 160-летним юбилеем В. Г. Шухова в 2013 г., в ИИЕТ РАН в конце 2011 г. было принято решение о создании точной цифровой 3D-модели башни. Целью проекта было сохранения точной и детальной информации об оригинальной «шуховской» конструкции до ее демонтажа и реставрации, обеспечение доступа к этой информации специалистам и широкой публике.

Проект по лазерному сканированию и 3D-моделированию башни был выполнен Центром виртуальной истории науки и техники ИИЕТ РАН при поддержке ООО «Триметари» (г. Санкт-Петербург) в 2011-2013 гг. Результаты проекта были опубликованы в ряде ведущих российских научных журналов и сборников [Аникушкин и др., 2012], [Аникушкин, Леонов, 2013], [Леонов, 2013б], [Леонов и др., 2013], [Леонов, 2015в], а также в ведущих научных и отраслевых зарубежных журналах [Anikushkin, Leonov, 2014a], [Anikushkin, Leonov, 2014b], [Leonov et al., 2015].

2.1.2 Лазерное сканирование и создание точечной 3D-модели

Лазерное сканирование башни было выполнено 1-2 декабря 2011 г. с использованием сканеров Leica ScanStation 2 и FARO Focus3D. Полевой этап длился три дня (30 ноября – подготовка, 1-2 декабря – основные работы), было сделано семь сканерных станций. Четыре станции располагались на поверхности земли в непосредственной близости от башни (одна внутри и три снаружи, в 5-10 м от башни), и еще три станции – на технологических площадках на разных уровнях (100, 125 и 141 м), рисунки 2.1 и 2.2.

Обработка результатов сканирования и сшивка сканов выполнялись в программе Leica Cyclone. Точность взаимного ориентирования сканов составила 7 мм, итоговая модель содержала порядка 100 млн. точек, рисунок 2.3. После удаления окружающих зданий и шума, была получена точечная 3D-модель непосредственно башни объемом около 60 млн. точек.

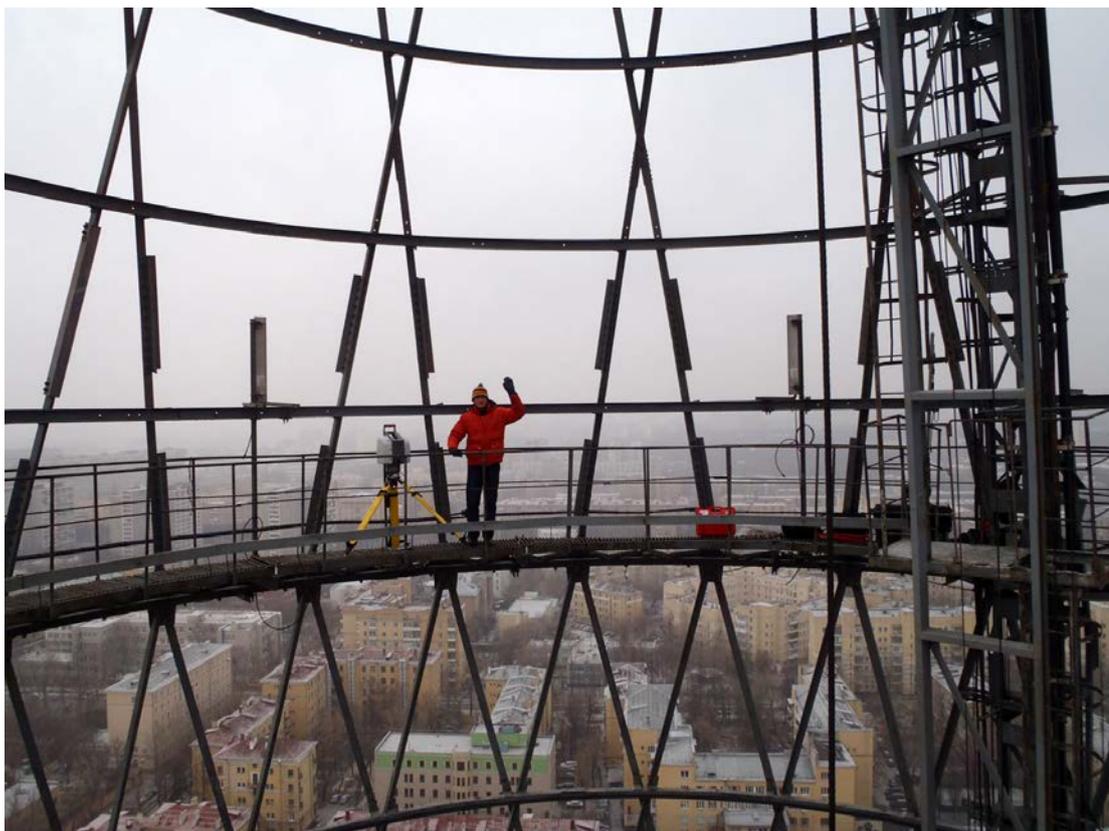


Рисунок 2.1 — Лазерное сканирование Шуховской башни, отметка 100 м (стык 4 и 5 секций)



Рисунок 2.2 — Лазерное сканирование Шуховской башни, отметка 125 м (стык 5 и 6 секций)

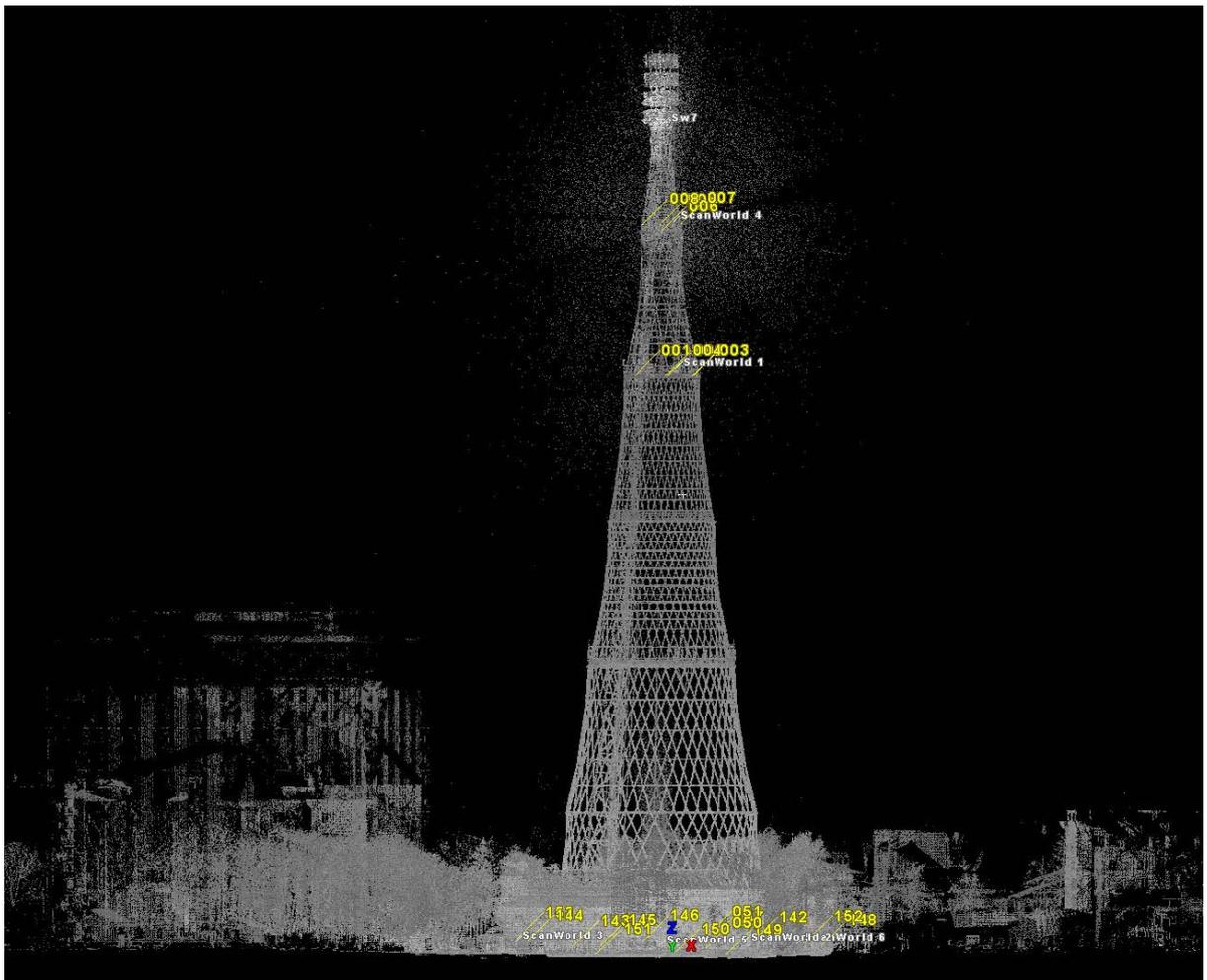


Рисунок 2.3 — точечная 3D-модель Шуховской башни («облако точек» лазерного сканирования)

Точечная 3D-модель была привязана к реперам в основании башни, а также к пунктам опорной геодезической сети Москвы.

2.1.3 Разработка методики моделирования

На основе результатов лазерного сканирования было выполнено твердотельное 3D-моделирование основных несущих конструкций башни, а также детальное полигональное 3D-моделирование башни. При моделировании ставилась задача добиться точности вписывания (т. е. среднего отклонения твердотельной или полигональной 3D-модели от облака точек) порядка точности взаимного ориентирования сканов.

Наибольшую сложность представляло собой моделирование скрученных стержней (швеллеров, уголков), из которых составлены гиперболоидные секции башни. Для достижения требуемой точности вписывания трехмерных моделей в облако точек применялся метод, состоящий из следующих шагов. Из облака точек выделяется часть, соответствующая отдельному элементу (например, швеллеру). Определяются края элемента, и проводится средняя линия. Перпендикулярно ей через каждые 2-3 м строятся секущие слои толщиной 1 см. По точкам, попавшим в секущий слой, вычисляется и затем вручную вписывается в облако точек сечение элемента (например, сечение швеллера N 14). Таким образом, получается набор из 10-12 сечений, по которым затем интерполируется профиль, рисунок 2.4.

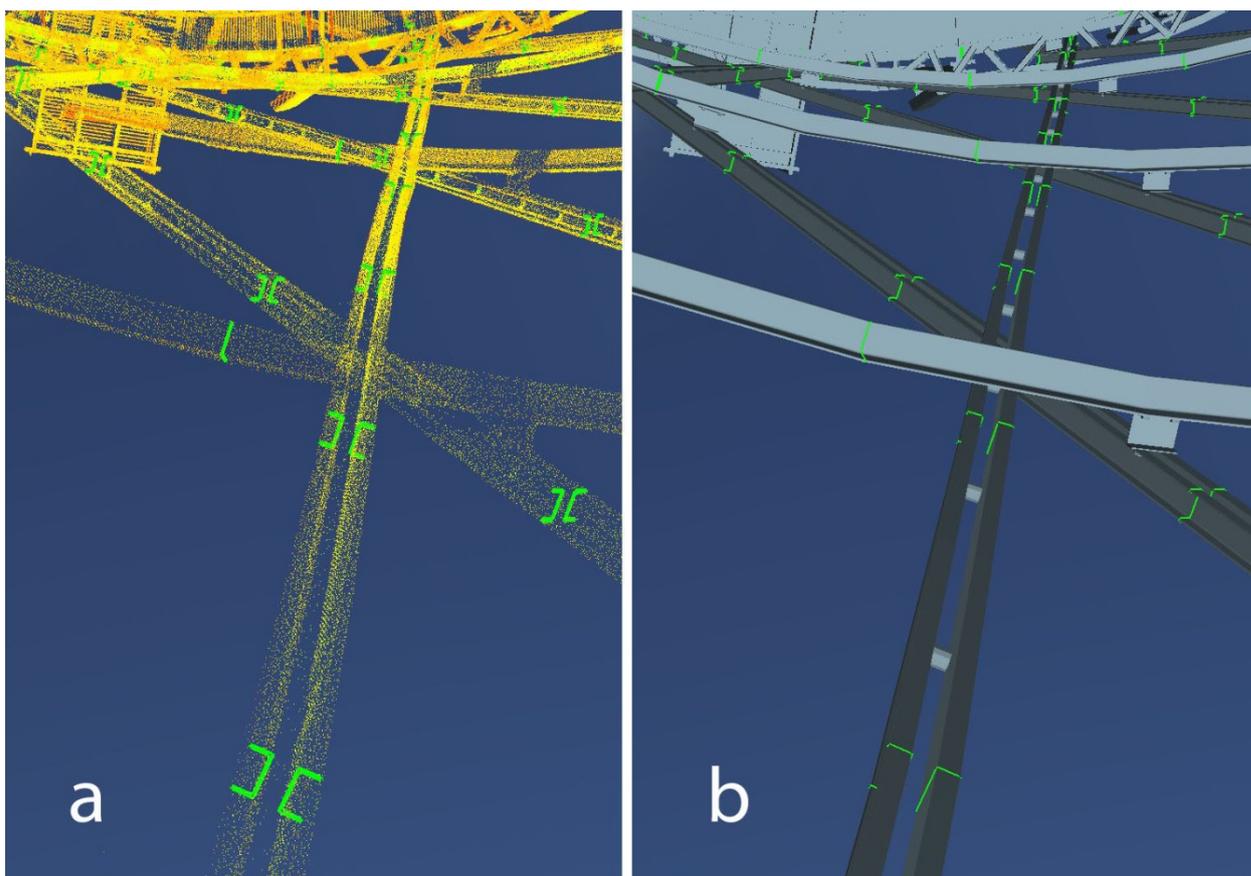


Рисунок 2.4 — Расстановка сечений в облаке (а)
и 3D-моделирование по сечениям (б)

Средняя точность «вписывания» 3D-модели элемента в облако точек, достигаемая таким методом, составляет 4-8 мм, рисунок 2.5.

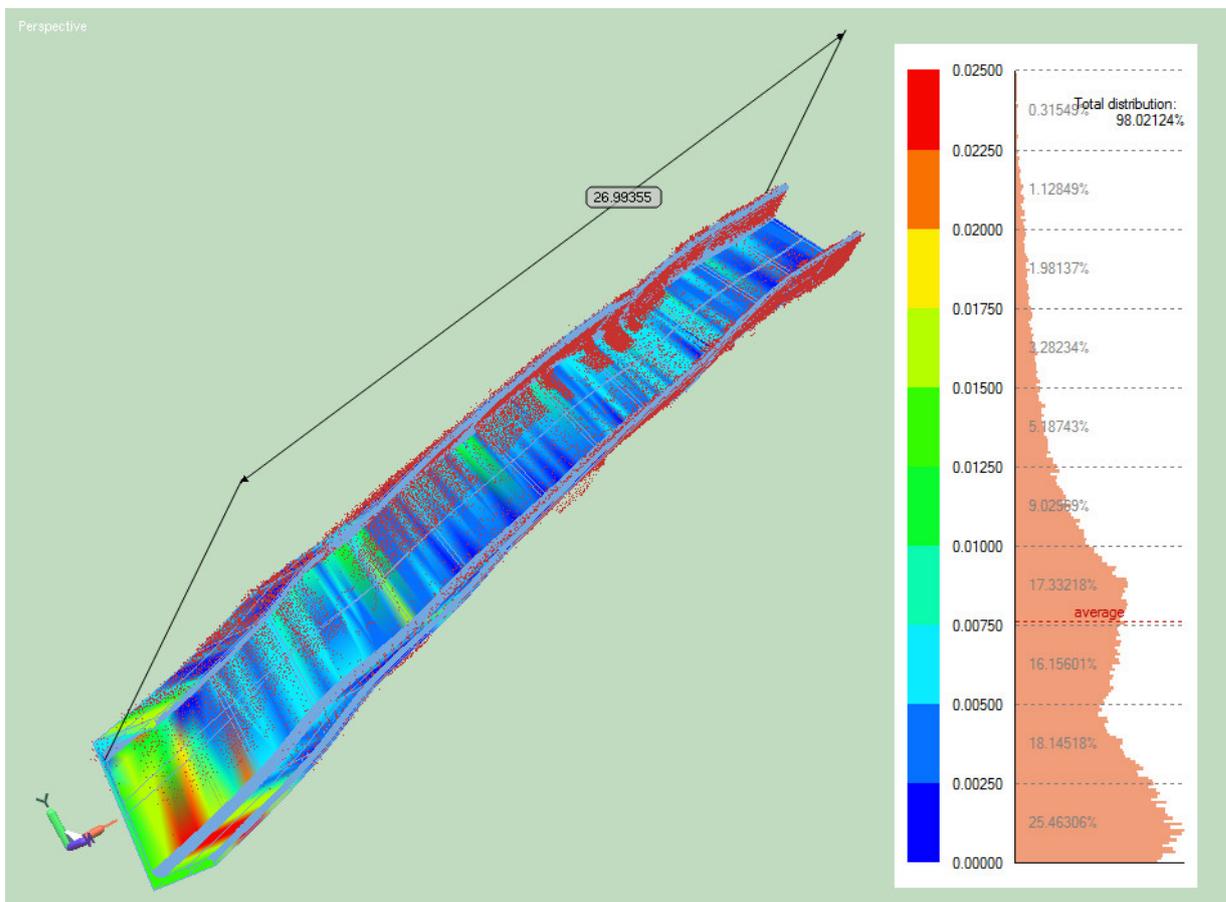


Рисунок 2.5 — Оценка точности 3D-моделирования швеллера методом интерполяции по сечениям.

Таким образом, средняя точность построенной виртуальной 3D-модели башни составляет около 1 см в единой системе координат. При этом 3D-модели отдельных элементов (скрученных стержней и колец жесткости) достоверно отражают их индивидуальные деформации.

2.1.4 Создание полигональной 3D-модели

Полигональное 3D-моделирование основных элементов несущей конструкции башни (ног и колец) было выполнено в среде Blender 3D на основе результатов лазерного сканирования. Все ноги и кольца смоделированы с использованием профиля (уголка или швеллера) соответствующего поперечного сечения, с учетом индивидуальных

деформаций. Точность 3D-моделирования ног и колец башни составила около 1 см в локальной системе координат, привязанной к опорной геодезической сети Москвы [Аникушкин, Леонов, 2013].

Также в 3D-модели были показаны все соединительные узлы между ногами разных секций, ногами и промежуточными кольцами жесткости, стыками частей ног разного профиля. Для моделирования соединительных узлов и мелких элементов конструкции, плохо читаемых в облаке точек лазерного сканирования, а также для контроля использовалась обмерная документация 1947 г. [Архив ЦНИИПСК, 1947], любезно предоставленная ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова, рисунок 2.6.

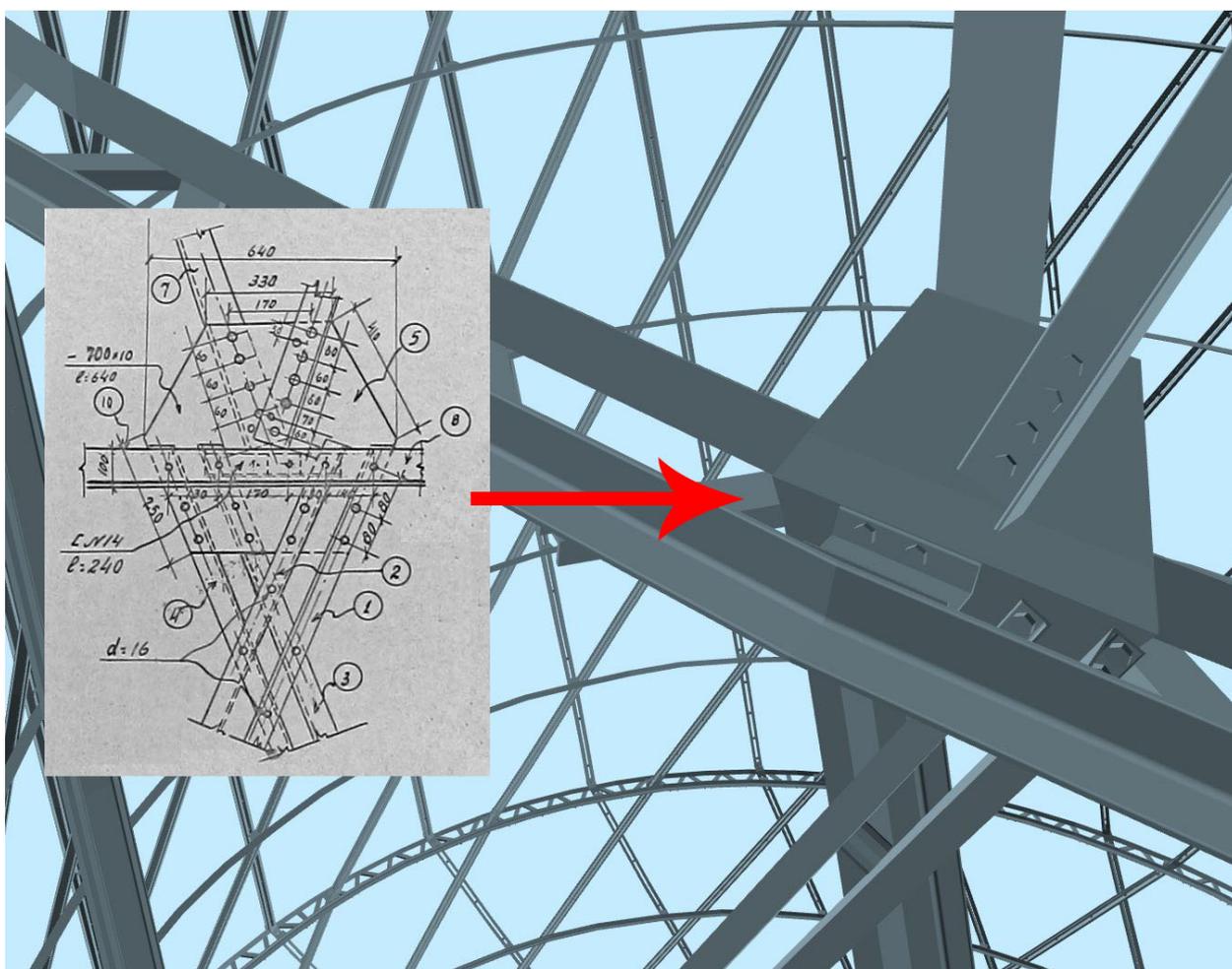


Рисунок 2.6 — 3D-моделирование соединительных узлов на основе сохранившейся обмерной документации

Общий вид созданной виртуальной 3D-модели Шуховской башни на Шаболовке показан на рисунках 2.7-2.9, степень детализации отражена на рисунках 2.10-2.12.

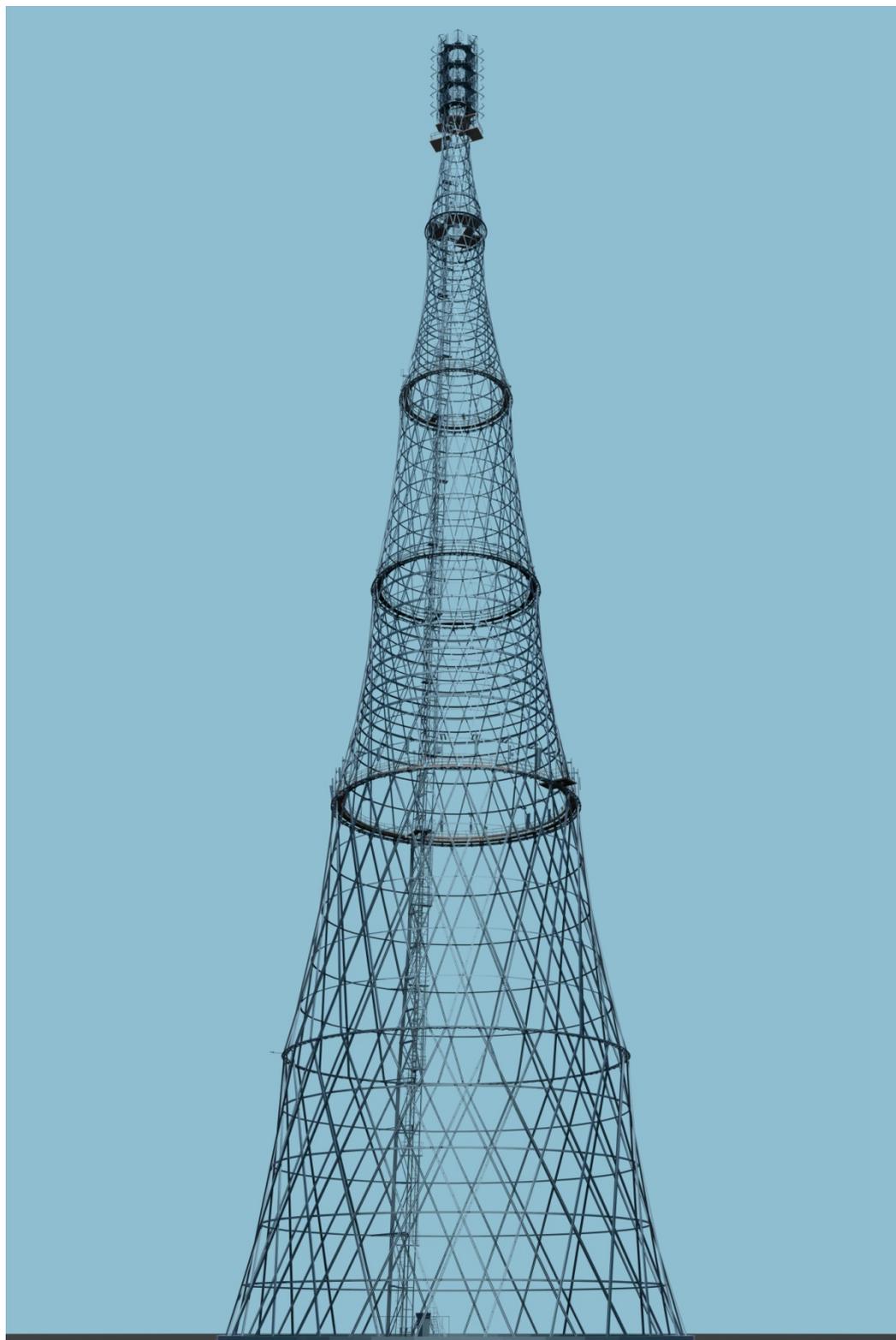


Рисунок 2.7 — 3D-модель башни, общий вид

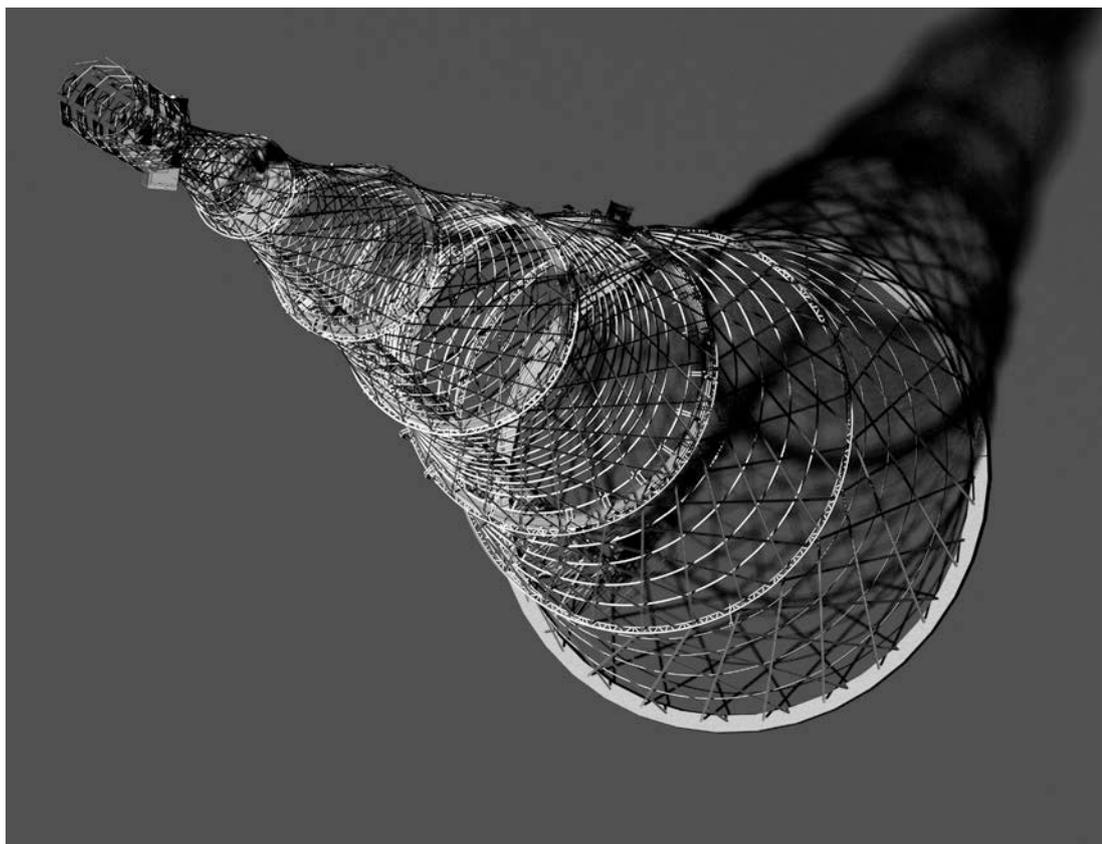


Рисунок 2.8 — 3D-модель башни, общий вид сверху

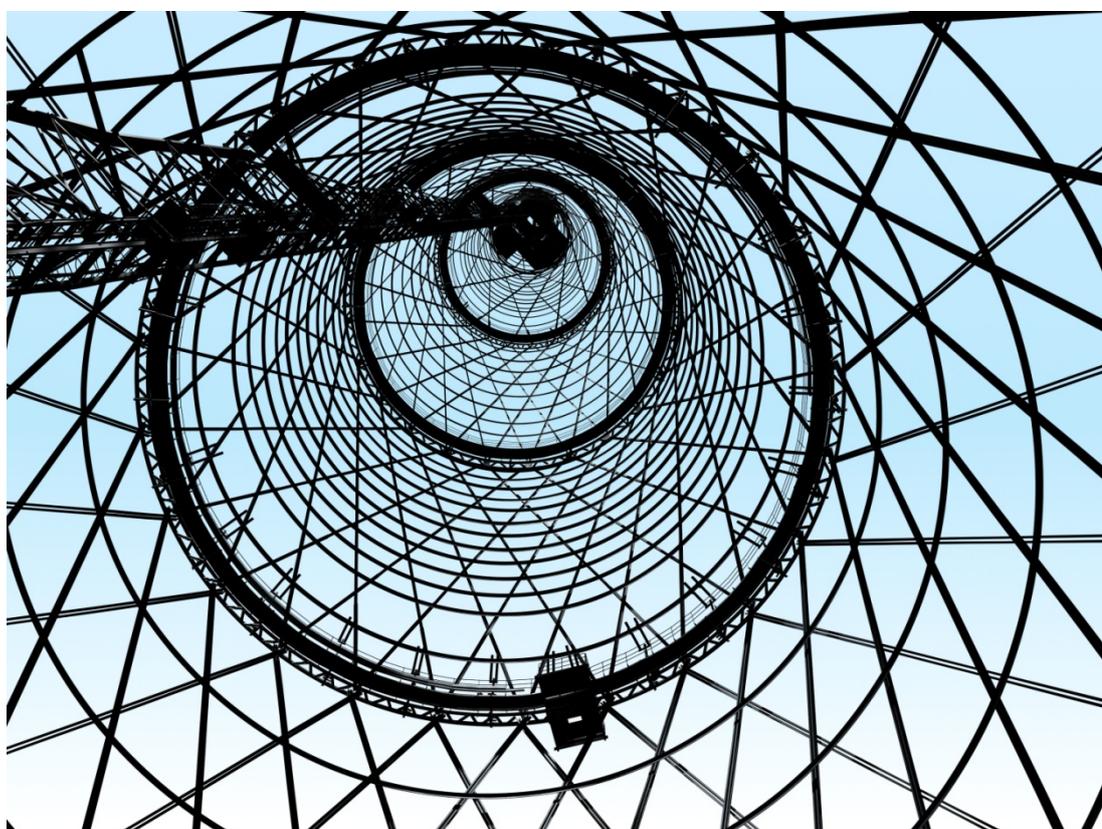


Рисунок 2.9 — 3D-модель башни, общий вид изнутри

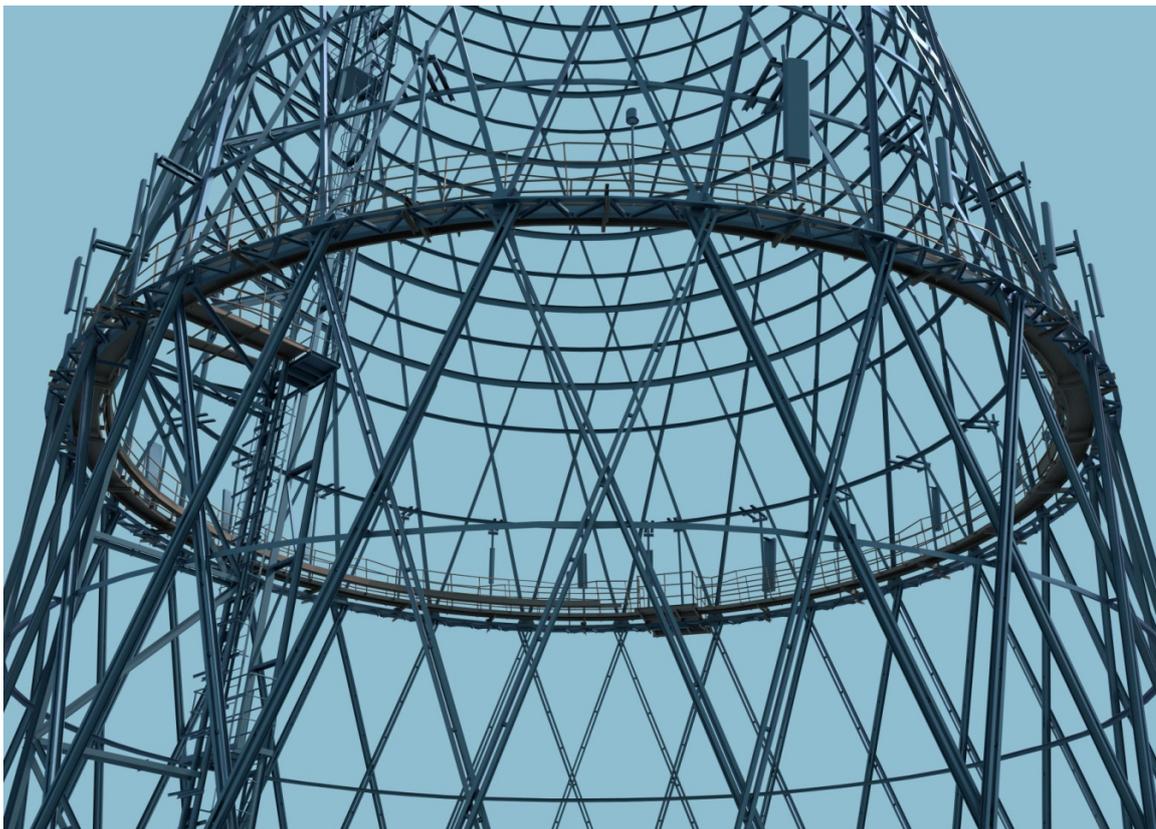


Рисунок 2.10 — 3D-модель башни, стык 2 и 3 секций



Рисунок 2.11 — 3D-модель башни, стык 2 и 3 секций, крупно



Рисунок 2.12 — 3D-модель башни, стык 3 и 4 секций,
крупный план соединительного узла

2.1.5 Сравнение с аналогичными работами

Помимо проекта, представленного в настоящей работе, в 2011 г. были созданы еще две 3D-модели башни.

Детальная 3D-модель башни на основе линейных обмеров и фотографий была создана в 2011 г. в Математическом институте им. В. А. Стеклова РАН под руководством к. ф.-м. н. Н. Н. Андреева,

заведующего Лабораторией популяризации и пропаганды математики [Андреев и др., 2012б]. В начале 2012 г. на основе этой 3D-модели был создан научно-популярный фильм с компьютерной анимацией процесса постройки башни. В ходе 3D-моделирования и работы над фильмом была реконструирована технология подъема секций башни, что позволило обнаружить ошибку в имевшемся ранее описании этой технологии.

Также в 2011 г. лазерное сканирование и 3D-моделирование несущей конструкции башни было выполнено специалистами ООО «НПП "Бента"» [Виноградов, Степанов, 2011]. Работы были выполнены по заказу ООО «Качество и надежность» и использовались при разработке проектной документации по реставрации башни [Гранев и др., 2012]. Лазерное сканирование производилось импульсным сканером Riegl VZ-400 в режиме LongRange. Полевой этап длился три дня, было сделано семь сканерных станций на расстоянии 100-200 м от башни (три на поверхности земли и четыре на близлежащих зданиях). Взаимное ориентирование сканов выполнялось по 6 сканерным маркам, расположенным на первом ярусе башни. Итоговая модель содержит около 50 млн. точек, точность взаимного ориентирования сканов авторы оценивают в 3-4 см. По результатам сканирования была создана каркасная модель башни, которая использовалась в дальнейшем для инженерных расчетов, а также твердотельная 3D-модель. Сравнение двух 3D-моделей, построенных по результатам лазерного сканирования двумя различными командами специалистов полностью независимо друг от друга, показало хорошее соответствие между ними [Корчуков, Леонов, 2013].

2.1.6 Анализ отличий реальной конструкции от исторической документации

В ходе выполнения проекта по моделированию башни был проведен анализ доступной исторической документации по конструкции башни (к которой относится проектная, рабочая и обмерная документация); выявлены

различия между исторической документацией и фактической конструкцией башни [Леонов, 2013а], [Леонов, 2014а], [Леонов, 2015а], [Леонов, 2015б].

Обзор сохранившейся документации. Проектная и рабочая документация по башне практически не сохранилась, в Архиве РАН и РГАНТД находятся лишь несколько разрозненных чертежей. Сохранившаяся проектная документация представлена расчетами в рабочей тетради В.Г. Шухова за январь-февраль 1919 г. [Архив РАН, 1918-1922, Л. 25-30] и двумя чертежами 1919 г. [Архив РАН, 1919а], [Архив РАН, 1919б], которые хранятся в Архиве РАН. Сохранившаяся рабочая документация представлена двумя чертежами 1921 г., которые хранятся в РГАНТД [РГАНТД, 1921а], [РГАНТД, 1921б].

В 1947 г. был выполнен подробный обмер конструкции башни [Архив ЦНИИПСК, 1947]. В пояснительной записке отмечается: *«Техническая документация (технический проект, рабочие чертежи и расчеты) по башне не сохранились. В 1937 году, для установки антенны телевизионного центра и подводки фидера по высоте башни до вышки, была установлена металлическая двухстенчатая ферма и выполнены три площадки (на отметке 141,768; 144,3 и 148,378 м.) На все металлоконструкции выполненные по реконструкции имеются рабочие чертежи»* [Архив ЦНИИПСК, 1947, черт. 281-3]. Однако уже в 1971 г. документация 1937 г. считалась утерянной: *«В 1937 году трестом "Радиострой" была выполнена реконструкция башни: установлена металлическая двухстенчатая ферма и выполнены три площадки на отметке 141,768; 144,3 и 148,378 м. Техническая документация на строительство и реконструкцию башни не сохранилась»* [Архив ЦНИИПСК, 1971, черт. 569-4].

В 1971 г. было выполнено определение несущей способности металлоконструкций башни и составлено заключение о возможности ее дальнейшей эксплуатации [Архив ЦНИИПСК, 1971]. В пояснительной записке отмечено: *"Основные геометрические размеры башни, отметки и диаметры опорных колец приняты в соответствии с выпуском № 281*

Проектстальконструкции 1947 г. Сечения элементов башни приняты на основании выпуска № 281 Проектстальконструкции 1947 года и материалов обследования ОРПС Министерства связи СССР 1971 г.» [Архив ЦНИИПСК, 1971, черт. 569-5].

В 1991 г. был подготовлен проект надстройки для крепления антенн УКВ-ЧМ [Архив ЦНИИПСК, 1991]. Общая схема башни, приведенная в этом проекте, повторяет схему 1947 г. [Архив ЦНИИПСК, 1991, лист 2]. В частности, на ней не указаны дополнительные промежуточные кольца жесткости, установленные в 1973 г., технологические площадки на уровнях 50, 75, 100, 125 м и некоторые другие элементы.

Таким образом, все сведения о геометрии башни, приведенные в доступной документации по состоянию на 2011 г. (в т.ч. [Архив ГСПИ РТВ, 1969], [Архив ЦНИИПСК, 1971 и 1991]) были основаны на обмере 1947 г. и не отражали актуального на тот момент состояния башни.

Внешний обвод контура башни. Первый расчет массы башни высотой 250 м сделан в рабочей тетради В. Г. Шухова 27.01.1919 г. [Архив РАН, 1918-1922, Л. 25]. 1.02.1919 г. выполнен расчет массы башни высотой 320 м из девяти секций (две секции высотой по 20 м, и семь секций высотой по 40 м) [Архив РАН, 1918-1922, Л. 26, 26 об.]. В тот же день начинается подробный расчет массы и конструкции башни произвольной высоты из секций высотой 25 м [Архив РАН, 1918-1922, Л. 26 об.-28]. Секции нумеруются сверху вниз римскими цифрами. Расчет прерван на XV секции, таким образом, полностью рассчитана башня высотой 350 м (14 секций по 25 м). Все ноги предполагаются из сдвоенного швеллера (от №10 для I секции до №18 для XIV секции). Диаметр опорных колец растет линейно: от 5 м для I секции до 70 м для XIV секции. 12.02.1919 г. продолжается расчет башни высотой 350 м из 14 секций: для каждой секции указано количество ног, их конструкция и общая масса [Архив РАН, 1918-1922, Л. 28 об., 29]. Выполнены краткие расчеты массы башен высотой 75 м, 100 м, 150 м [Архив РАН, 1918-1922, Л. 29 об.].

28.02.1919 г. в тетради выполнен расчет башни высотой 150 м из шести секций по 25 м. Для каждой секции указан радиус опорного кольца, количество и конструкция ног [Архив РАН, 1918-1922, Л. 30]. На отдельной странице поясняется способ расчета радиуса опорных колец, включающий линейную и квадратичную компоненты зависимости от номера секции:

*«Внешний обвод контура башни. Основной размер. Конус с переменным r набегающим постоянное приращение; в нашем случае $r, 2r, 3r, 4r...$ или вообще $r, r+f, r+2f, r+3f$ и т.д. и переменное приращение с непрерывным увеличением уклона от вертикали α . т.е. приращение уклона выражается формулой $\alpha * n * (n-1)/2$, где n номер этажа башни считая его от верха. Таким образом получается следующий ряд: 1) f , 2) $2f+\alpha$, 3) $3f+3\alpha$, 4) $4f+6\alpha$, 5) $5f+10\alpha$, 6) $6f+15\alpha$, 7) $7f+21\alpha$, 8) $8f+28\alpha$ и т.д. причем задаются размеры r, f и α . В данном случае $r = 2,75$ м, $f = 2,75$ м = r , $\alpha = 0,25$ м и потому радиусы получаются 2.75, 5.75, 9, 12.5, 16.25, 20.25 (уклоны 3 → 3.25 → 3.5 → 3,75 → 4)» [Архив РАН, 1918-1922, Л. 30 об.].*

При высоте секции 25 м, расстояние от верха башни до опорного кольца n -й секции выражается формулой $H = 25 * n$. Радиус опорного кольца n -й секции, согласно предложенному выше способу расчета, выражается формулой $R = 2,75 * n + 0,25 * n * (n-1)/2$. Выразив n через H в первой формуле и подставив во вторую, получаем зависимость R от H : $R = H * H / 5000 + H * 21 / 200$. Таким образом, внешний обвод контура 150-метровой башни, предложенный в рабочей тетради В. Г. Шухова 28.02.1919 г., является параболой.

Фактические радиусы опорных колец Шуховской башни на Шаболовке совпадают с расчетом в тетради для четырех нижних секций. В верхней части башни внешний контур обвода расходится с расчетным: для кольца на уровне 100 м фактический радиус на 10% больше, чем расчетный, на уровне 125 м – на 29% больше, на уровне 141 м – на 95% больше, рисунок 2.13. На чертеже 1919 г. [Архив РАН, 1919а] внешний обвод контура башни совпадает с фактическим.

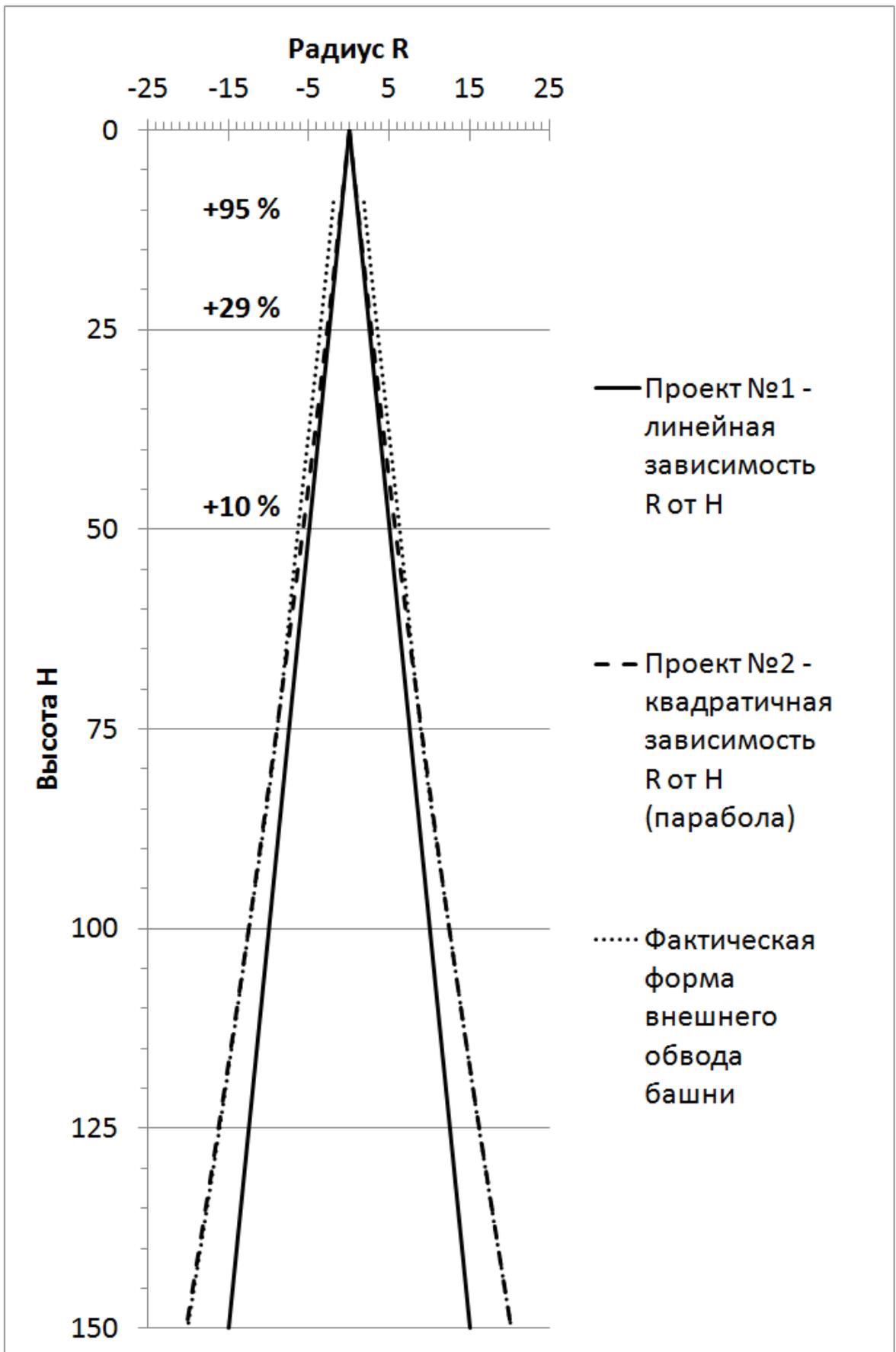


Рисунок 2.13 — Внешний обвод башни: сравнение проектов из рабочей тетради В. Г. Шухова и фактической геометрии

Чертеж 350-метровой башни [Архив РАН, 1919б] не соответствует расчетам в тетради как по количеству и высоте секций, так и по зависимости радиуса опорных колец от высоты. Внешний обвод контура башни на этом чертеже визуально соответствует квадратичной зависимости, которая была предложена в тетради только для 150-метровой башни.

Конструкция секций башни. Фактическая конструкция секций башни (количество и конструкция ног) существенно расходится с расчетами в рабочей тетради [Архив РАН, 1918-1922, Л. 30], см. таблицу 2.1. По проекту предполагалась единообразная конструкция ног всех секций (из сдвоенных швеллеров), в реальности, для четырех верхних секций использовались уголки, а не сдвоенные швеллера.

Таблица 2.1 — Конструкция секций башни: по проектам и фактическая

Номер секции	Конструкция, по тетради (1919 г.)	Конструкция, по чертежу (1919 г.)	Конструкция, фактическая (1922 г.)
6 (I сверху)	Ноги: 12 сдвоенных швеллеров №10 Кольца: не указано	Ноги: сдвоенные линии. Кольца: 8 шт.	Ноги: 24 уголка 90 мм (внизу) и 80 мм (вверху) Кольца: 9 шт.
5 (II сверху)	Ноги: 16 сдвоенных швеллеров №12 Кольца: не указано	Ноги: сдвоенные линии. Кольца: 8 шт.	Ноги: 24 уголка 90 мм Кольца: 9 шт.
4 (III сверху)	Ноги: 24 сдвоенных швеллера №12 Кольца: не указано	Ноги: сдвоенные линии. Кольца: 6 шт.	Ноги: 48 уголков 90 мм Кольца: 9 шт.
3 (IV сверху)	Ноги: 24 сдвоенных швеллера №14 Кольца: не указано	Ноги: сдвоенные линии. Кольца: 8 шт.	Ноги: 48 уголков 120 мм (внизу) и 100 мм (вверху) Кольца: 7 шт.
2 (V сверху)	Ноги: 30 сдвоенных швеллеров №14 или 36 сдвоенных швеллеров №12 Кольца: не указано	Ноги: сдвоенные линии. Кольца: 4 шт.	Ноги: 48 сдвоенных швеллеров №14 Кольца: 4 шт.
1 (VI сверху)	Ноги: 36 сдвоенных швеллеров №14 Кольца: не указано	Ноги: сдвоенные линии. Кольца: 4 шт.	Ноги: 48 сдвоенных швеллеров №14 Кольца: 4 шт.

На чертеже [Архив РАН, 1919а] определить количество и конструкцию ног затруднительно; можно утверждать лишь то, что ноги во всех секциях показаны сдвоенными линиями, что соответствует проекту в тетради. Количество промежуточных колец жесткости на чертеже [Архив РАН, 1919а] в четырех верхних секциях отличается от фактического, см. таблицу 2.1.

Конструкция соединительных узлов. Поскольку проект, представленный в тетради В. Г. Шухова, предполагал единообразную конструкцию ног всех секций (из сдвоенных швеллеров), по-видимому, предполагалась и единообразная конструкция стыков ног разных секций, что нашло отражение на проектном чертеже [Архив РАН, 1919а]. В реальности, фактическая конструкция узла стыка ног разных секций оказалась индивидуальна для каждой пары секций.

Схемы узлов стыка ног, приведенные на чертеже 1919 г. [Архив РАН, 1919а], не соответствуют фактической конструкции. В частности, на обеих схемах показан стык ног из сдвоенного швеллера №10 (в реальности таких ног на башне нет); на схеме «Соединение ног двух секций» фасонка расположена в радиальной плоскости (тогда как в реальности все фасонки на стыках ног расположены перпендикулярно радиальной плоскости и имеют другую форму); фактический способ крепления ног и фасонки к кольцевой ферме отличается от изображенного на схемах. Схема «Верхнее кольцо II секции» отдаленно напоминает фактическую конструкцию узла соединения ног первой и второй снизу секций, но форма и размер фасонки и расположение заклепок на этой схеме заметно отличаются от фактического.

Таким образом, фактическая конструкция узлов соединения ног разных секций не имеет практически ничего общего со схемами на чертеже [Архив РАН, 1919а]. К сожалению, во многих изданиях, посвященных Шаболовской радиобашне, схема «Соединение ног двух секций» 1919 г. приводится как схема фактической конструкции. В частности, она приведена в книге ученика и биографа В. Г. Шухова Г. М. Ковельмана 1961 г. [Ковельман, 1961, С. 157] и в книге «Шухов В. Г. (1853-1939). Искусство конструкции» 1995 г.

[Шухов..., 1995, С. 92, 94], без каких-либо оговорок о том, что в реальности конструкция соединительных узлов совершенно другая.

Рабочая схема узла соединения ног 2 и 3 секции 1921 г., хранящаяся в архиве РГАНТД [РГАНТД, 1921б], внешне похожа на фактическую конструкцию этого узла, однако при анализе обнаруживается ряд расхождений. Уголки внутреннего и наружного колец на схеме показаны обушками вверх (а швеллера обрешетки лежат на них сверху, полками вверх); фактически уголки внутреннего и наружного колец установлены обушками вниз (а швеллера обрешетки приклепаны к ним снизу, полками вниз). Внутреннее кольцо на схеме показано из равнополочного уголка 100x100x10 мм, фактически — из неравнополочного уголка 150x100x12 мм. Наружное кольцо на схеме показано из уголка 100x100x16 мм, фактически — из уголка 100x100x12 мм. Длина коротышей из швеллера №14 между фасонкой и опорными кольцами на схеме указана 356 мм, фактически — 240 мм; на схеме коротыши расположены полками вниз, фактически — полками вверх.

Отметим, что стык между 2 и 3 секциями монтировался дважды. 29 июня 1921 года при подъеме четвертой секции произошла авария – уже смонтированная к тому моменту третья секция сломалась, четвертая упала и повредила вторую и третью. После возобновления работ, первые две секции были отремонтированы, а третья – полностью разобрана и затем собрана заново. Повторный подъем и монтаж третьей секции был выполнен в конце октября 1921 г. Схема [РГАНТД, 1921б] датирована 9 августа 1921 г. – всего через десять дней после 30 июля, когда В. Г. Шухов сделал знаменитую запись в своем дневнике: «Приговор Шухову – условный расстрел» [Шухова, 2004]. Неизвестно, отражает ли эта схема реальную конструкцию стыка 2 и 3 секций в первом варианте его исполнения, или является проектом для повторного монтажа стыка – так или иначе, фактическая конструкция имеет существенные отличия.

Высота башни. В рабочей тетради В. Г. Шухова [Архив РАН, 1918-1922] сохранились записи за февраль 1919 г. с расчетами башен различной высоты, состоящих из нескольких гиперболоидных секций. В частности, выполнен расчет массы башни высотой 320 м из девяти секций (две верхних секции высотой по 20 м, и семь секций высотой по 40 м) [Архив РАН, 1918-1922, Л. 26, 26 об.]; расчет башни произвольной высоты из секций высотой по 25 м каждая с линейной зависимостью диаметров опорных колец от высоты (расчет прерван на 15-й секции) [Архив РАН, 1918-1922, Л. 26 об. – 29 об.]; расчет башни высотой 150 м из шести секций высотой по 25 м каждая с квадратичной зависимостью диаметров опорных колец от высоты [Архив РАН, 1918-1922, Л. 30]. Последний расчет наиболее близок к фактической конструкции [Леонов, 2013а], [Леонов, 2014а]. Однако в реальности верхняя секция Шаболовской радиобашни имеет меньшую высоту, чем остальные секции, а на ее верхнее кольцо установлена надстройка (антенная секция). Этот вариант изображен и на проектной чертеже 1919 г. [Архив РАН, 1919а]. По личному сообщению, полученному автором от Е. М. Шуховой 27.04.2015 г., в хранящемся у нее дневнике В. Г. Шухова сохранилась запись за 13 мая 1921 г.: «*Шестая секция: 16 ног, швеллер № 10, высота 20 м, число колец 5*». В реальности в шестой секции 24 ноги из уголка 90 мм (в нижней части ног) и 80 мм (в верхней части ног), и 9 промежуточных колец.

В обмерной документации 1947 г. указан уровень верхнего кольца шестой секции: 144,16 м, уровень нижнего опорного кольца первой секции – 0,5 м [Архив ЦНИИПСК, 1947]. Таким образом, полная высота несущей конструкции (шести гиперболоидных секций) по документации 1947 г. – 143,66 м. Эти же цифры приведены в обмерной документации 1971 г. [Архив ЦНИИПСК, 1971].

В 1991 г. была произведена замена исторической надстройки (антенной секции) башни на новую. При этом на шестой секции было установлено новое кольцо на высоте 0,3...0,36 м ниже верхнего кольца [Архив

ЦНИИПСК, 1991], после чего все конструкции, лежащие выше нового кольца, были срезаны и демонтированы. Таким образом, в 1991 г. высота шестой секции уменьшилась на 0,3...0,36 м.

Таким образом, исходя из сведений, содержащихся в архивной обмерной документации, высота несущей конструкции башни к настоящему времени должна составлять 143,3...143,36 м.

Однако согласно данным лазерного сканирования, выполненного специалистами ООО «Триметари» в 2011 г. в рамках нашего проекта, современная высота несущей конструкции башни составляет 144,61 м. Все результаты сканирования и моделирования, включая первичные данные лазерного сканирования – трехмерную точечную модель – переданы в РГАНТД и доступны для независимой проверки [РГАНТД, 2013].

Кроме того, в 2011 г. ООО ПСП «КиН» по заказу филиала ФГУП «РТРС» «Московский региональный центр» была выполнена разработка проекта реконструкции башни, в ходе которой также было проведено ее лазерное сканирование [Виноградов, Степанов, 2011]. Согласно проектной документации, подготовленной ОАО «ЦНИИПромзданий» по заказу ООО ПСП «КиН», современная высота несущей конструкции башни составляет 144,40 м [ЦНИИПромзданий, 2011, Л. 2]. Выяснить причину расхождения с нашими данными не представляется возможным, т.к. трехмерная точечная модель, по которой разрабатывалась документация [Архив ЦНИИПромзданий, 2011], недоступна для проверки и сравнения.

Таким образом, результаты современных обмеров башни с применением технологии лазерного сканирования позволяют утверждать, что высота башни в 1947 г. была измерена с ошибкой более чем в 1 метр относительно истинной высоты (в меньшую сторону). По нашим данным, истинная высота несущей конструкции башни в 1922-1991 гг. составляла 144,91...144,97 м. Эта цифра близка к «круглому» значению 145 м, что с точки зрения автора является дополнительным аргументом в ее пользу. В. Г. Шухов использовал «круглые» значения высоты секций (20, 25, 40 м) в

своих проектных расчетах, и логично предположить, что для укороченной верхней секции Шаболовской радиобашни также было использовано «круглое» проектное значение 20 м. Это подтверждается и записью в дневнике В. Г. Шухова, хранящемся у Е. М. Шуховой.

О креплении промежуточных колец к ногам 1-й и 2-й секций. Каждая из двух нижних секций башни состоит из 48 ног: 24 внутренних (наклоненных по часовой стрелке, если смотреть сверху) и 24 внешних (наклоненных против часовой стрелки, если смотреть сверху). В каждом месте пересечения внешняя и внутренняя ноги соединены друг с другом четырьмя заклепками.

Каждая нога представляет собой два швеллера №14, развернутых друг к другу стенками и разнесенных на 60 мм друг от друга. Примерно через каждые 0,5 м эти швеллера соединены друг с другом заклепками. Ножка каждой заклепки проходит внутри отрезка металлической трубы, установленного между швеллерами.

Изнутри к ногам каждой секции крепятся четыре промежуточных кольца жесткости. Каждое такое кольцо непосредственно примыкает к внутренним ногам и находится на расстоянии 140 мм от внешних ног. Таким образом, каждое промежуточное кольцо должно быть в 24 местах каким-то образом прикреплено к внешним ногам.

В проектной документации 1919 г. предполагалось крепление колец жесткости к внешним ногам через скобу, установленную в один из узлов крепления швеллеров ноги друг с другом [Архив РАН, 1919а]. В реальности, в первой секции используется два различных способа крепления колец жесткости к внешним ногам: через скобу и через отрезок швеллера №14 (коротыш), рисунок 2.14. Скоба используется для всех стыков первого промежуточного кольца и для 15 стыков второго промежуточного кольца первой секции, рисунок 2.15. Почти во всех остальных стыках первой и второй секций используются коротыши; по меньшей мере в двух местах крепление отсутствует.

Скоба крепится к промежуточному кольцу одной заклепкой, коротыш – двумя. Во многих местах на кольцах первой секции между двумя заклепками, которыми крепится коротыш, есть неиспользуемое отверстие, рисунок 2.16. В некоторых местах неиспользуемое отверстие есть и рядом с заклепкой скобы, рисунок 2.17. Все фотографии на рисунках 2.14-2.17 сделаны автором летом 2014 г.



Рисунок 2.14 — Нижняя часть 1 секции башни: для крепления второго промежуточного кольца используются как скобы, так и коротыши



Рисунок 2.15 — первое промежуточное кольцо первой секции:
крепление к ноге через скобу



Рисунок 2.16 — третье промежуточное кольцо первой секции:
неиспользуемые отверстия между заклепками коротышей



Рисунок 2.17 — Второе промежуточное кольцо первой секции:
неиспользуемые отверстия рядом с заклепками скоб

Можно предположить, что способ крепления колец к ногам был изменен (упрощен) непосредственно в процессе монтажа второго промежуточного кольца первой секции, а неиспользуемые отверстия, сохранившиеся на кольцах выше, были заготовлены под заклепки для крепления скоб. Крепление через скобу сложнее в реализации: при этом один из узлов крепления швеллеров ноги друг с другом должен быть совмещен с узлом крепления ноги к кольцу, а значит, требуется либо монтировать кольцо одновременно со сборкой самих ног, либо точно рассчитывать высоту установки скоб и соответствующие им отверстия на кольцах. Судя по несовпадению заклепки скобы с заготовленным отверстием в некоторых узлах второго промежуточного кольца, точный расчет мест установки скоб и ответных отверстий на практике оказался достаточно сложен. Крепление через коротыш существенно проще в монтаже: при этом сборка самой ноги и крепление кольца жесткости к этой ноге могут выполняться независимо.

2.1.7 Анализ и оценка новизны результатов

Лазерное сканирование башни, выполненное в ходе работ, позволило зафиксировать общую геометрию конструкции с высокой точностью и

пространственным разрешением. Полученное облако точек является наиболее полной первичной 3D-документацией геометрии башни. Цифровая 3D-модель башни, созданная в результате проекта, является наиболее точной и детальной из существующих моделей. С высокой точностью и детализацией смоделированы все основные конструктивные элементы шести гиперболоидных секций (скрученные стержни, опорные кольца, промежуточные кольца жесткости) и соединительные узлы. Также смоделированы дополнительные элементы (технологические платформы, лифт и др.), и визуализирована сложная трехмерная конструкция разных типов соединительных узлов.

Геометрическая точность моделирования, достигнутая в ходе выполнения проекта, избыточна с точки зрения практических задач сегодняшнего дня. Как показывает опыт аналогичных работ, инженерные расчеты могут выполняться с использованием более простых 3D моделей. Поэтому выполненный проект должен рассматриваться, прежде всего, как цифровая фиксация (3D-документирование) памятника техники и архитектуры, создание цифрового (виртуального) наследия.

Таким образом, в результате проекта была сохранена информация о геометрии и конструкции башни в цифровой электронной форме, обеспечен доступ к этой информации всем заинтересованным специалистам и широкой публике. Созданная виртуальная модель может использоваться для исследования конструкции башни, изучения истории ее постройки, контроля точности реставрации-реконструкции, инженерных расчетов, а также для разнообразных научно-популярных и образовательных приложений.

В ноябре 2013 г. созданные 3D-модели башни вместе с программным обеспечением для их просмотра были переданы в Российский государственный архив научно-технической документации (РГАНТД) как первый документ нового типа – 3D-документ [РГАНТД, 2013]. Таким образом, был создан надежный документальный задел как для независимой

оценки результатов реконструкции-реставрации, так и для восстановления башни в случае неожиданной аварии.

Цифровая модель существенно упрощает доступ к данным о конструкции башни и позволяет привлечь широкий круг исследователей, в том числе зарубежных, к историческому и техническому анализу. В частности, 3D-модель позволяет выделить все элементы башни, не отраженные в доступной архивной документации, и таким образом поставить ряд вопросов для дальнейшего исторического исследования. Отметим, что виртуальная 3D-модель позволяет изучать конструкцию объекта с точек наблюдения, недоступных исследователю в реальности, рисунок 2.18.

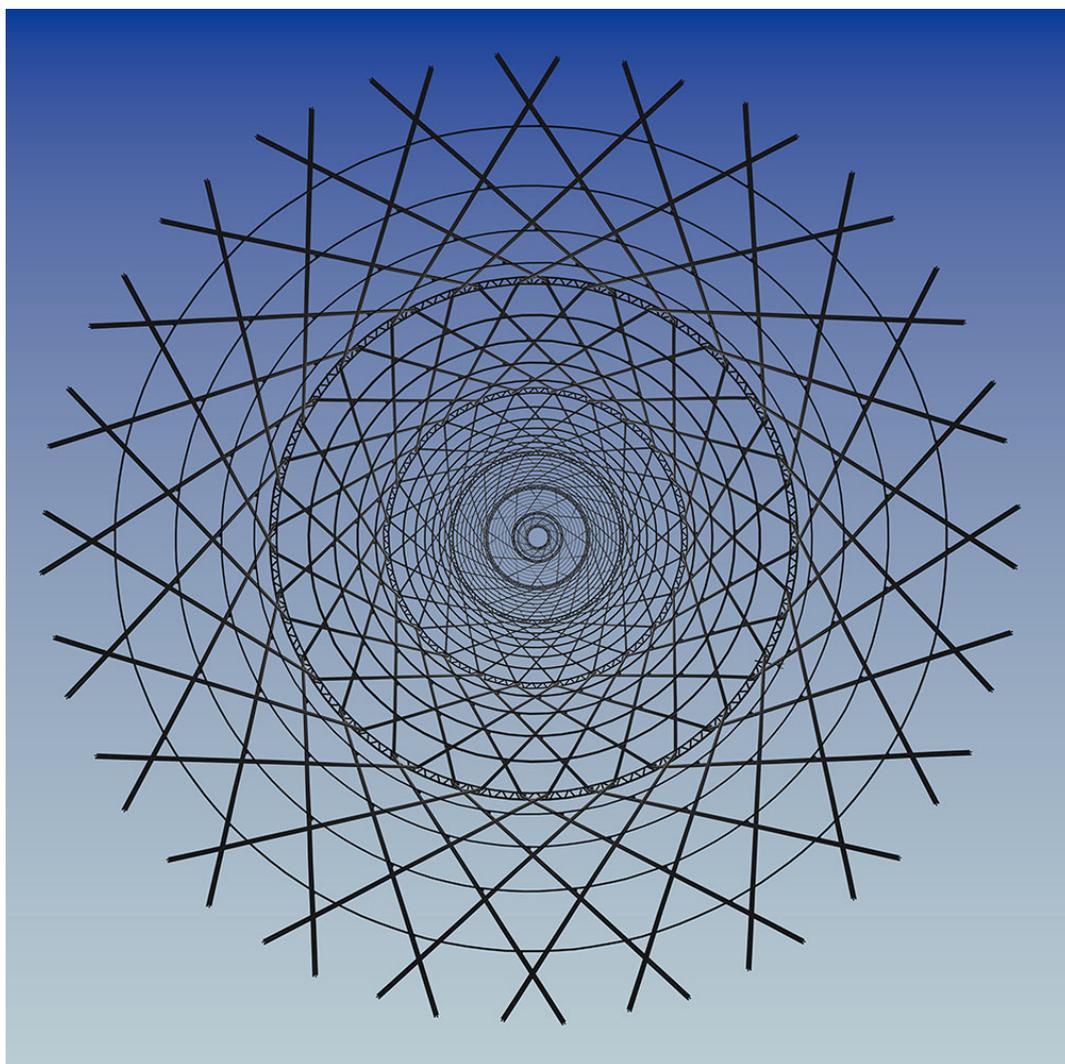


Рисунок 2.18 — Виртуальная 3D-модель Шаболовской радиобашни: вид с невозможной в реальности точки наблюдения (из-под земли), нижнее опорное кольцо и надстройка (антенная секция) не показаны.

В ходе работ был выполнен анализ внешнего обвода контура башни, конструкции секций башни и конструкции соединительных узлов (по документации и фактически), исследован вопрос о высоте башни и способе монтажа промежуточных колец нижней секции. Показано, что фактическая конструкция башни имеет существенные отличия от сохранившихся проектных и рабочих чертежей 1919-1921 гг., а также расчетов в рабочей тетради В.Г.Шухова 1919 г. Установлено, что приведенные в архивных документах сведения о высоте несущей конструкции башни более чем на метр отличаются от истинного значения. Согласно нашим данным, высота несущей конструкции башни в 1922-1991 гг. составляла приблизительно 145 м. Также установлено, что способ монтажа промежуточных колец был упрощен непосредственно в процессе монтажа.

Анализ показал, что обмерная документация 1947 г. и более поздняя соответствует фактической конструкции башни на момент выполнения обмеров. Однако необходимо отметить, что обмерная документация создавалась с целью расчета несущей способности конструкции, и не отражает целый ряд деталей и элементов оригинальной конструкции, не имеющих отношения к ее несущей способности. В частности, в ней не задокументированы индивидуальные деформации элементов, не указано расположение стыков составных частей ног и колец башни, монтажные отметки и отверстия, клейма на металле. Кроме того, доступная к 2011 г. обмерная документация и созданные на ее основе проекты реконструкции башни [Архив ЦНИИПСК, 1947], [Архив ГСПИ РТВ, 1969], [Архив ЦНИИПСК, 1971], [Архив ЦНИИПСК, 1991] не отражали целый ряд элементов, установленных на башне в 1973 г. и позже. В частности, нигде в доступной к 2011 г. документации не были отражены усиливающие накладки в нижней части 5 секции и на некоторых местах отбора проб; дополнительные кольца жесткости и кольцевая вертикальная ферма в верхней части 5 секции, установленные в 1973 г.; технологические платформы на уровнях 50, 75, 100, 138 м.

Таким образом, виртуальное 3D-моделирование конструкции позволило эффективно обнаружить и проанализировать расхождение исторической документации с фактической конструкцией, выявить целый ряд отличий реальной конструкции от проектной, рабочей и обмерной документации, и выявить ошибки в описании памятника техники.

2.2 Виртуальное 3D-моделирование крупномасштабного природного объекта: на примере Долины гейзеров на Камчатке

Долина гейзеров, расположенная в Кроноцком заповеднике на Камчатке – одна из самых известных природных достопримечательностей России. Это единственное в Евразии крупное скопление гейзеров (периодически фонтанирующих кипящих источников). Долина гейзеров занимает второе место в мире по числу гейзеров после Йеллоустонского национального парка в США [Bryan, 2008, p. 422].

Долина гейзеров находится на территории Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника, который включен в Список объектов Всемирного природного наследия ЮНЕСКО в номинации «Вулканы Камчатки». Из-за удаленного расположения и заповедного статуса Долину посещают всего несколько тысяч человек в год. В 2007 г. здесь произошел крупный оползень, в результате которого многие гейзеры были завалены или затоплены, а рельеф территории заметно изменился.

Для того чтобы сохранить информацию об этом уникальном объекте и истории его исследований, а также сделать эту информацию доступной широкой публике, был выполнен проект по созданию виртуальной 3D-модели Долины гейзеров [Леонов, 2009], [Леонов и др., 2009], [Леонов и др., 2010], [Бобков и др., 2010], [Leonov et al., 2010], [Алейников и др., 2011], [Леонов и др., 2011], [Leonov et al., 2011], [Леонов и др., 2012], [Леонов, 2014e]. Проект был поддержан грантом РФФИ 09-07-06042-г.

В ходе проекта было выполнено детальное исследование истории развития картографии и топонимики района Долины гейзеров, анализ

исторических карт и схем, в том числе с использованием созданной 3D-модели территории [Леонов, 2017], [Leonov, 2017]. Виртуальное 3D-моделирование оказалось эффективным средством анализа и систематизации исторической картографической и топонимической информации.

В результате проекта впервые была создана точная цифровая 3D-модель территории Долины гейзеров, привязанная к мировой системе координат [Аникушкин, Леонов, 2014]; современный каталог объектов (гейзеров, горячих источников и др.) [Леонов, 2012a], [Леонов, 2012б], [Леонов, 2017]; набор документальных стерео-видеофильмов об основных объектах; общедоступный веб-сайт www.valleyofgeysers.com. Также было разработано интерактивное 3D-приложение для «виртуального путешествия» по Долине гейзеров с поддержкой стерео-режима, которое позволяет изучить рельеф местности и расположение объектов, ознакомиться с общей схемой работы гейзера и геотермальной системы [Алейников и др., 2011].

Создание 3D-модели позволило сохранить и систематизировать историческую информацию о Долине гейзеров, а также обеспечить широкий доступ к данным об этом природном объекте для научных и просветительских задач. Виртуальная 3D-модель территории Долины гейзеров, созданная в рамках проекта, используется также для решения ряда актуальных научных задач, в частности, для анализа оползневых процессов, визуализации локальной сейсмической активности.

2.2.1 Мотивация выполнения работы

В 2007 г. в Долине гейзеров сошел крупный оползень, в результате которого примерно половина известных гейзеров были завалены обломочной лавиной и затоплены подпрудным озером. Специалистами сразу было отмечено, что вероятность формирования новых оползней в этом районе остается очень высокой, и при этом нет практической возможности их предотвратить (эти прогнозы оправдались в 2014 и 2017 гг., когда в этом районе произошли новые оползни и сходы селевых потоков).

Реальная возможность дальнейшего необратимого изменения Долины гейзеров в результате естественных природных процессов обусловила высокую актуальность сохранения ее существующего облика и динамики изменений в форме детальной цифровой 3D-модели (виртуальной реконструкции), которая могла бы сохранить информацию об этом уникальном объекте и истории его изучения для будущих поколений.

Развитие «виртуального наследия» – свободно доступных детальных цифровых моделей памятников культуры, архитектуры или природных объектов – рассматривается исследователями во многих странах как важная деятельность по популяризации собственной культуры, истории, природы, а также по формированию имиджа страны за рубежом. По аналогии с детальными цифровыми моделями и виртуальными реконструкциями античных городов или архитектурных памятников, в отношении которых употребляется термин «виртуальное культурное наследие» (Virtual Cultural Heritage), виртуальную 3D-модель природной территории можно назвать «виртуальным природным наследием» (Virtual Natural Heritage).

2.2.2 Разработка методики работы

В основу выполнения проекта были положены концепции неогеографии и виртуального окружения. Концепция неогеографии подразумевает использование виртуальной модели территории (или Земли в целом – виртуального глобуса) с мировой системой координат для представления разнородных данных в едином географическом контексте. Концепция виртуального окружения подразумевает демонстрацию виртуальной модели объекта и связанных с ней данных в интерактивном стереоскопическом режиме, обеспечивающем «погружение» пользователя в пространство модели и интуитивную манипуляцию данными.

Практическое применение обеих концепций для решения конкретной задачи — создания виртуальной модели Долины гейзеров — потребовало решения ряда технических и методических задач. Во-первых, потребовалось

провести существенное развитие программного инструментария виртуального глобуса, включая поддержку полупрозрачного рельефа и отображения подземных данных, корректный импорт и отображение наземных данных в формате Keyhole Markup Language (KML), поддержку модульного меню с развитой функциональностью управления, реализацию эффективного веб-доступа к спутниковому покрытию (как к открытым данным ДЗЗ, так и к данным высокого разрешения). Во-вторых, потребовалось решить методическую задачу обеспечения двух режимов отображения виртуальной модели: для стереоскопических проекционных систем «виртуального окружения» и для массового использования в сети Интернет, с доступом к единой базе данных.

Для создания цифровых моделей рельефа применялись традиционные методы фотограмметрии, однако потребовалась их адаптация для спутниковой съемки высокого разрешения и конкретного типа аэрофотосъемки, которые использовались в качестве исходных данных. Для определения координат характерных точек на местности и привязки спутникового снимка высокого разрешения к мировой системе координат WGS84 использовалась спутниковая геодезическая съемка (в дифференциальном режиме с опорными базовыми станциями КФ ГС РАН). Методическая сложность выполнения этой работы заключалась в невозможности предварительной подготовки опознавательных знаков на местности из-за статуса заповедной территории, а также в большом удалении опорных базовых станций от места измерений (105 и 185 км).

Создание каталога объектов потребовало решения ряда методических задач, включая выбор основного названия объекта (в тех случаях, когда известно несколько названий), классификацию термопроявлений (гейзеров, кипящих источников и др.), выработку единых правил написания составных названий на русском языке и выработку методики передачи имен собственных на иностранном языке.

Стереоскопическая видеосъемка и особенно обработка и монтаж отснятого материала оказались связаны с целым рядом технических и методических сложностей, которые удалось удовлетворительно решить только через три года после начала проекта (к 2012 г.).

Таким образом, в ходе выполнения проекта потребовалось искать новые и оригинальные решения разноплановых методических и технических задач. Полученный опыт, безусловно, может эффективно применяться при выполнении аналогичных проектов.

2.2.3 Создание и геопривязка 3D-модели территории

В качестве основы для создания 3D-модели использовался цветной спутниковый снимок GeoEye-1 от 06.09.2009 с разрешением 0,5 м и цифровая модель рельефа с разрешением 5 м, предоставленные компанией ООО «ИТЦ «СКАНЭКС», рисунок 2.19. Цифровая модель рельефа была создана на базе спутниковой стереопары Cartosat от 19.09.2007 с разрешением 2,5 м.



Рисунок 2.19 — 3D-модель рельефа в районе Долины гейзеров, общий вид (размер смоделированной территории примерно 8x8 км).

Для точной привязки спутникового снимка к абсолютным координатам была проведена спутниковая геодезическая съемка, в результате которой

снимок был привязан к мировой системе координат ITRF/WGS84 с дециметровой точностью [Аникушкин, Леонов, 2014]. Были определены координаты 12-ти характерных точек на местности (контрастная разметка вертолетных площадок, отдельно стоящие камни, стыки и границы настильных троп) в мировой системе координат WGS84 с точностью 0,1-0,5 м. Методическая сложность выполнения работы заключалась в невозможности предварительной подготовки опознавательных знаков на местности из-за статуса заповедной территории. В качестве характерных точек можно было использовать только имеющиеся элементы инфраструктуры (домики, тропы, вертолетные площадки), либо природные объекты (например, отдельно стоящие камни). Пример одной из выбранных точек приведен на рисунке 2.20 [Аникушкин, Леонов, 2014].

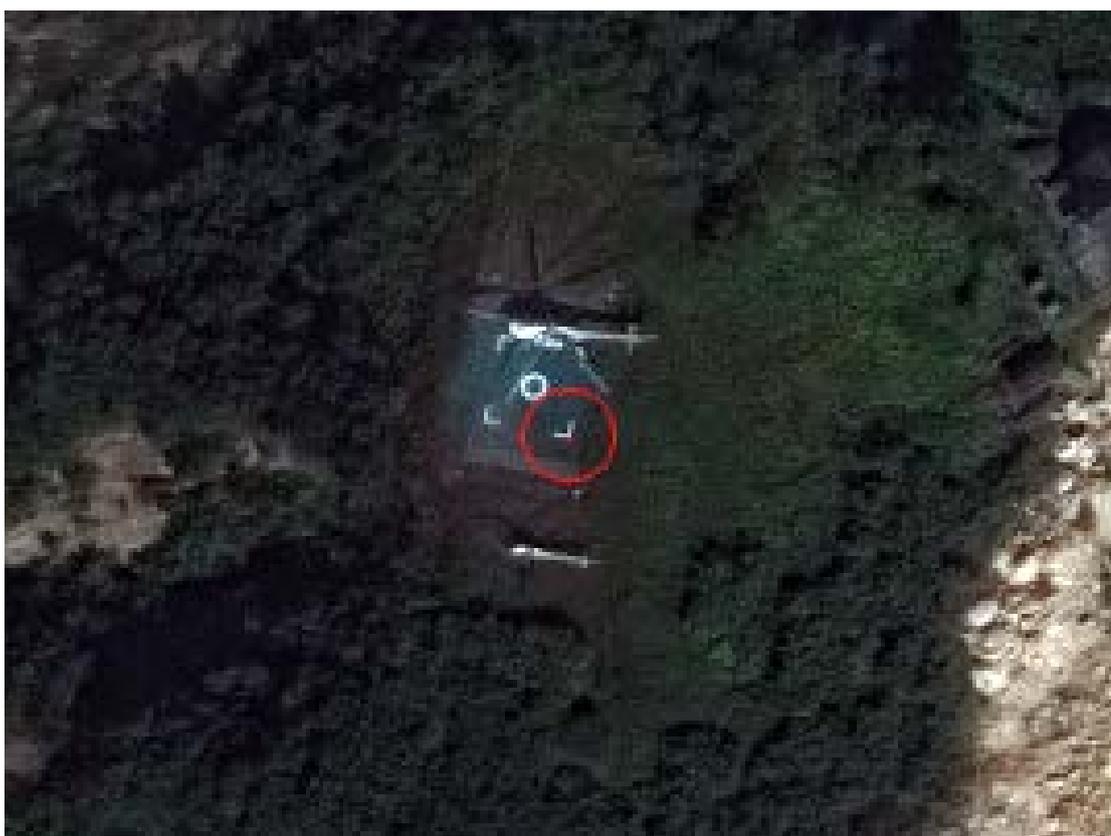


Рисунок 2.20 — Пример характерной точки, использованной для геопривязки спутникового снимка. Верхняя вертолетная площадка; юго-восточный угол контрастной разметки, нанесенный краской на металл; внешнее острие угла.

Для измерений использовался двухчастотный геодезический GPS-приемник Trimble 5700 с антенной Trimble Zephyr Geodetic. Съёмка в каждой точке выполнялась от 1 до 3,5 часов. Обработка данных выполнялась в дифференциальном режиме с опорными базовыми станциями Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН MIL1 (пос. Мильково, 105 км от места измерений) и Геофизической службы РАН PETS (г. Петропавловск-Камчатский, 185 км от места измерений). Координаты базовых станций и данные GPS с этих станций за необходимый период времени были любезно предоставлены КФ ГС РАН. Сначала были вычислены вектора от базовых станций до характерных точек, а затем – координаты характерных точек. Погрешность определения координат составила для разных точек от 0,1 до 0,5 м. Полученные результаты были использованы для точной привязки спутникового снимка GeoEye-1 от 06.09.2009 г. к мировым координатам. Привязку снимка по характерным точкам с учетом цифровой модели рельефа выполнил А.А. Алейников (ИТЦ «СканЭкс», г. Москва).

Модель территории, точно привязанная к мировым координатам, была внедрена на виртуальный глобус, рисунки 2.21-2.22. Таким образом, была создана современная геопространственная основа для района Долины гейзеров. Благодаря высокому разрешению 3D-модели территории, а также за счет ее сопоставления с историческими топографическими картами и схемами были определены с высокой точностью координаты термальных объектов – как существующих, так и утерянных к настоящему времени.

В дальнейшем виртуальная 3D-модель территории Долины гейзеров была использована для создания визуально реалистичной интерактивной 3D-презентации на основе виртуального глобуса, рисунки 2.23-2.24. 3D-модель территории была дополнена каталогом объектов, включающем координаты, описания, фотографии и видеосъемки основных достопримечательностей. Для увеличения визуальной реалистичности при отображении виртуального глобуса были применены эффекты имитации атмосферы.

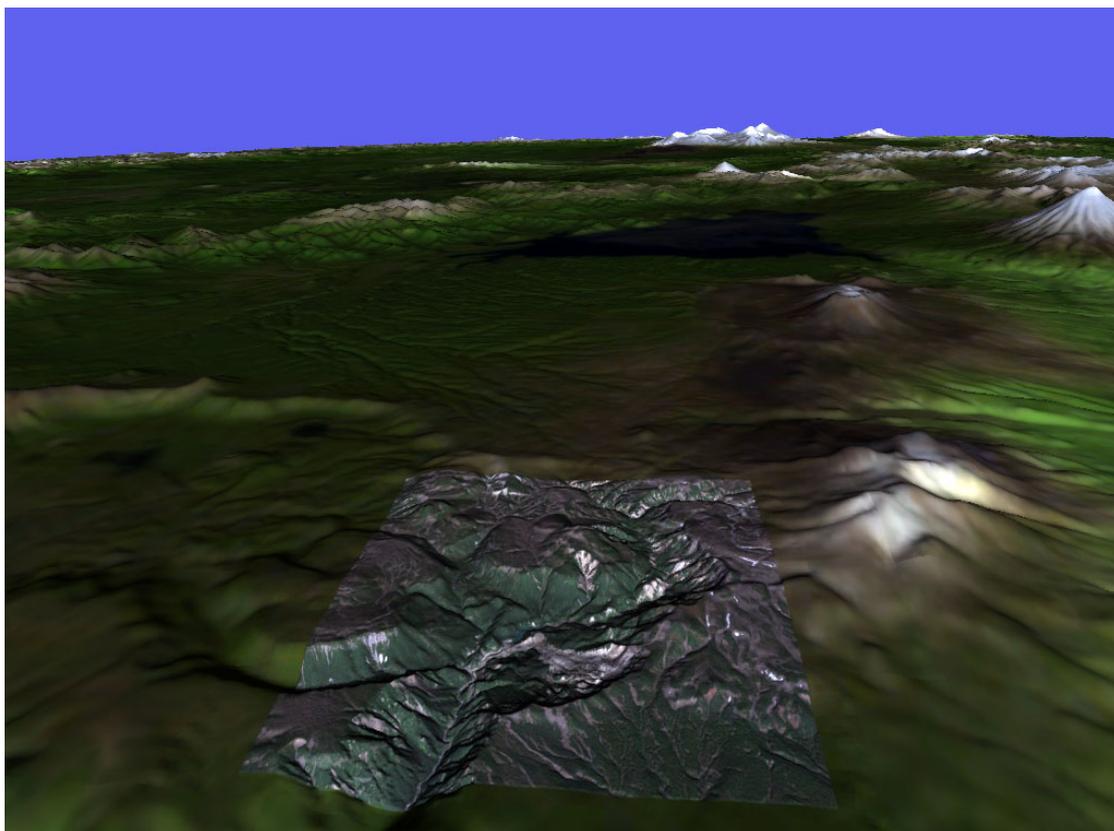


Рисунок 2.21 — 3D-модель территории высокого разрешения, внедренная на виртуальный глобус (визуализация атмосферы отключена)

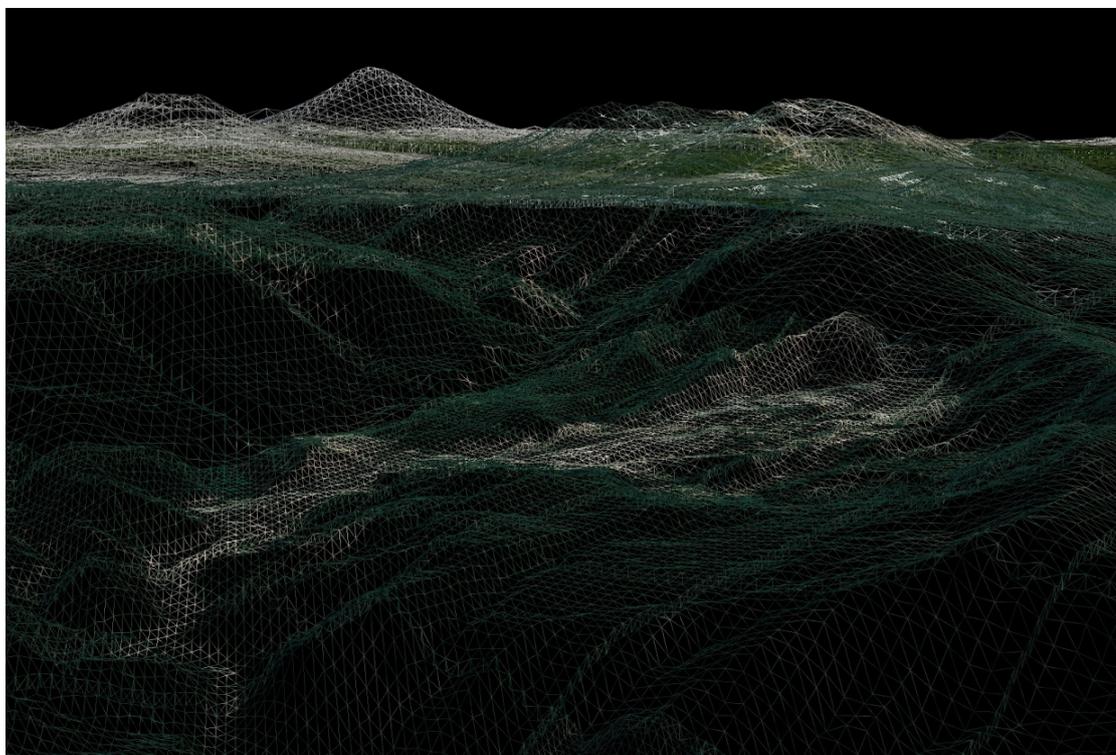


Рисунок 2.22 — 3D-модель территории на виртуальном глобусе при визуализации в виде триангуляционной сетки

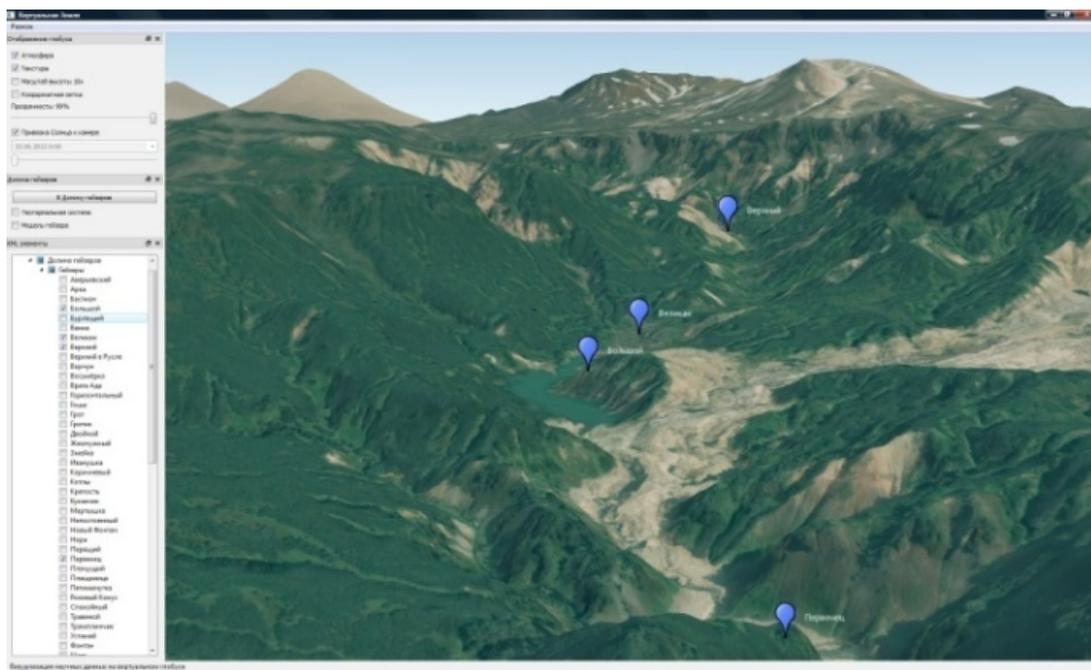


Рисунок 2.23 — 3D-модель территории при визуализации в составе интерактивной 3D-презентации на основе OpenSceneGraph

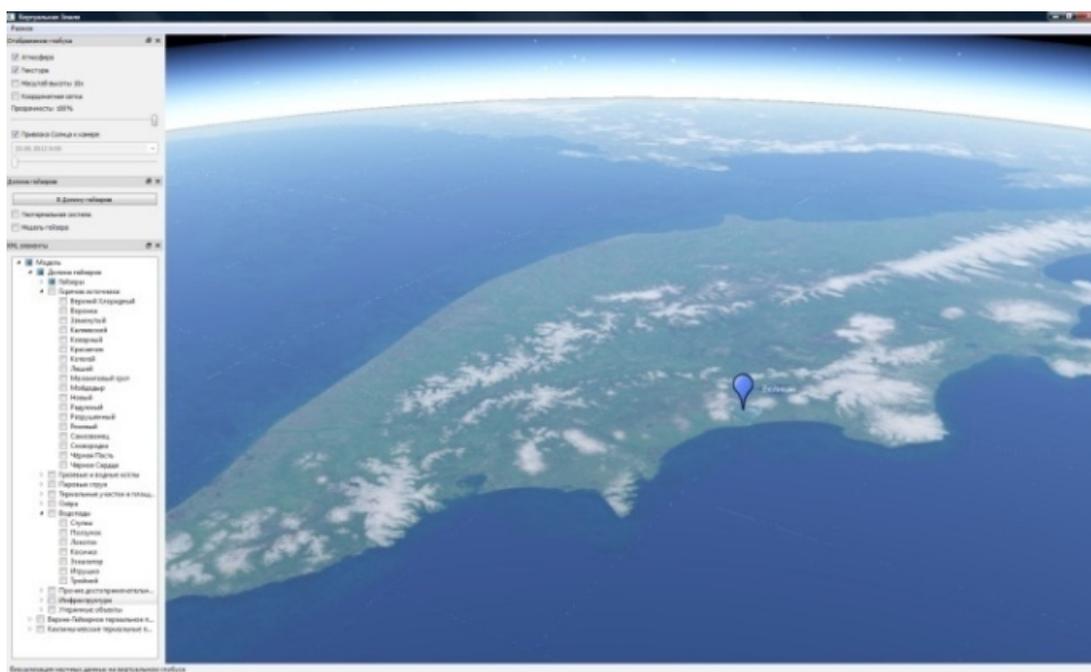


Рисунок 2.24 — Виртуальный глобус, общий вид Камчатского полуострова, маркером отмечено расположение Долины гейзеров

Впоследствии в приложение были также добавлены цифровые модели рельефа района Долины гейзеров по состоянию на 1978 и 1993 гг., созданные на основе исторических топографических карт и аэрофотосъемки.

2.2.4 Исследование истории картографии и топонимики и создание каталога термальных объектов

Для создания современного каталога объектов было выполнено исследование и анализ доступной литературы, предложены новые подходы к систематизации и классификации объектов. Результатом этой работы стало издание современного каталога гейзеров Кроноцкого заповедника [Леонов, 2017]. Ниже кратко описаны основные методические и исследовательские задачи, которые были решены в ходе создания каталога.

Долина гейзеров была открыта в 1941 г. сотрудниками Кроноцкого заповедника геологом Т. И. Устиновой и наблюдателем А. П. Крупениным. За 70 лет было опубликовано несколько систематических описаний гейзеров и других достопримечательностей Долины: книга Т. И. Устиновой [Устинова, 1955], статьи С. И. Набоко [Набоко, 1954], А. А. Райка (1963 г.), В. Н. Виноградова (1964 г.), глава в книге В. И. Семенова (1973 г.), отчет С. Т. Брайана и др. (1991 г.), книги А. М. Нечаева (2000 и 2007 г.), научно-популярные очерки В. М. Сугробова и др. [Сугробов и др., 2004], [Сугробов и др., 2009] и др. Количество объектов в систематических каталогах последовательно возрастало с 12 (статья Т. И. Устиновой 1946 г.) до более чем 70 (каталог С.Т. Брайана и др. и очерки В. М. Сугробова и др.).

Однако присвоение названий объектам – гейзерам, горячим источникам, грязевым и водным котлам, паровым струям, термальным площадкам, склонам и стенкам, а также озерам, водопадам, скалам и прочим достопримечательностям – никак не регулировалось, что привело к ряду расхождений между опубликованными изданиями. У разных авторов различаются перечни объектов и названия некоторых из них, написание составных названий, передача названий на английском языке. Во всех перечисленных изданиях часть объектов описана таким образом, что найти их на местности по описанию сложно или невозможно.

После оползня 2007 г. часть объектов в Долине гейзеров исчезла (гейзеры Тройной, Скалистый, Конус и др.), существенно изменился режим некоторых источников (Крепость, Первенец, Малый и др.), появились новые термопроявления. Многим специалистам, работа которых связана с этим районом, стало очевидно, что необходимо выполнить новое систематическое описание основных объектов Долины гейзеров, согласовать их названия, определить точные географические координаты, подготовить современные схемы расположения объектов на местности.

Основной задачей работы, выполненной автором, было согласование названий и определение координат для всех объектов Долины гейзеров с известными в литературе названиями — включая как существующие, так и утерянные (заваленные, затопленные или прекратившие работу по другим причинам) гейзеры и кипящие источники.

Исходные данные. В качестве основных источников информации использовались научные публикации и систематические описания Долины гейзеров, опубликованные в период 1946-2009 гг. Дополнительная информация была получена из географических карт и научно-популярных изданий. Кроме опубликованных работ, принимались во внимание личные сообщения и неопубликованные материалы, см. например рисунок 2.25.

Обследование объектов на местности и их документирование (описание, уточнение режима, фото- и видеосъемка) было выполнено автором вместе с коллегами С. Б. Самойленко, А. Е. Бобковым и В. А. Конышевым в ходе полевых работ в 2009-2011 гг. Для определения координат объектов и подготовки схем расположения объектов на местности использовался геопривязанный спутниковый снимок высокого разрешения GeoEye-1 от 06.09.2009 и 3D-модель территории Долины гейзеров.

При выполнении работы решались четыре основные методические задачи: выбор основного названия объекта в том случае, когда в литературе известно несколько названий; выработка подходов к составлению списка

гейзеров; выработка подходов к написанию составных названий; выработка подходов к передаче названий на английском языке.

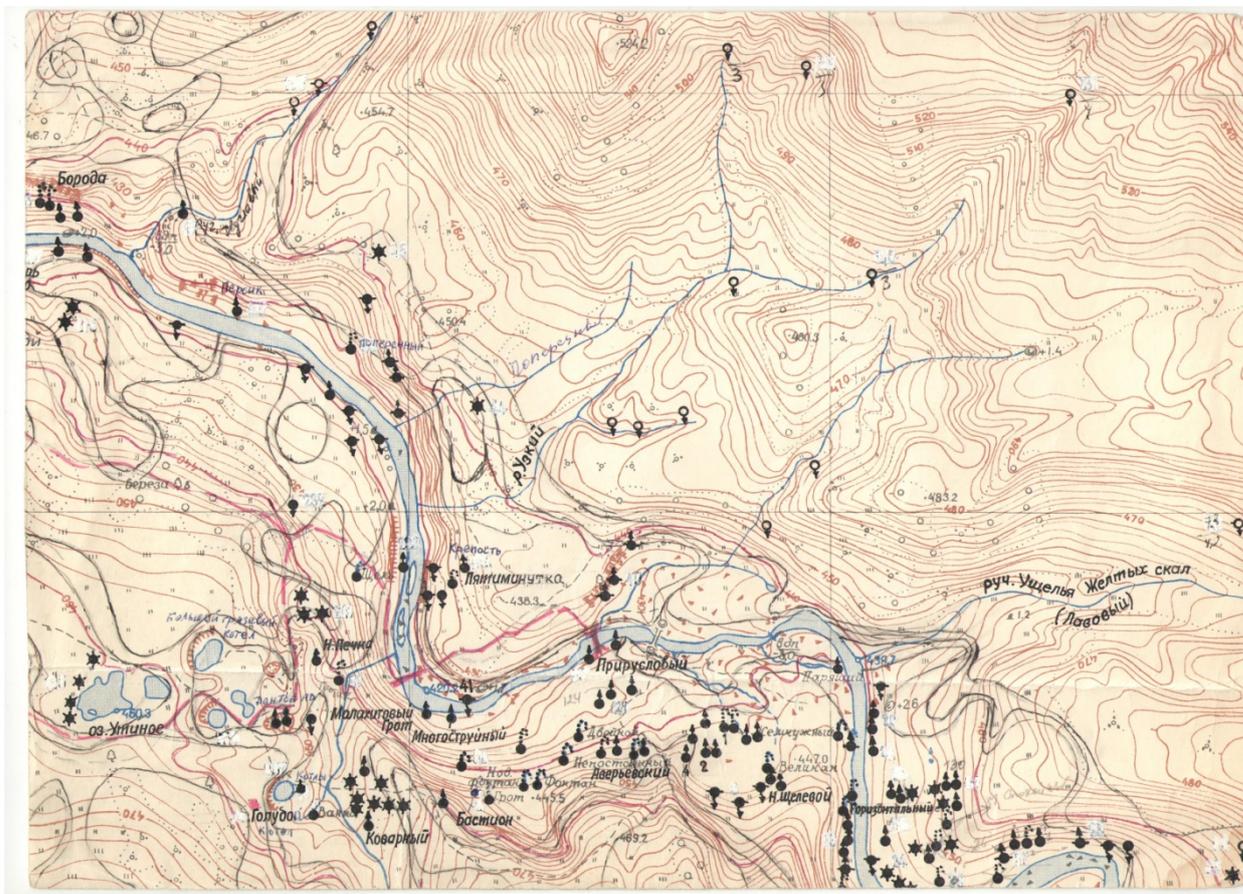


Рисунок 2.25 — Топографическая карта масштаба 1:2 000 (фрагмент) с нанесенными вручную отметками и названиями гейзеров и источников, 1975 г. Из архива В. М. Сугробова.

Выбор основного названия. В естественных науках существует историческое представление о «праве первооткрывателя», то есть праве присвоить имя открытому объекту. В наши дни, однако, первооткрыватель обычно не присваивает, а лишь предлагает имя, дальнейшее использование которого регулируется соответствующим уполномоченным органом с учетом как приоритета открытия, так и других факторов – устной традиции, общественного мнения, экспертной оценки и др.

Ситуация с названиями объектов в Долине гейзеров осложняется тем, что первооткрывателей у многих объектов нет, а авторы названий

неизвестны. Опубликованные работы, кроме статей и книги Т. И. Устиновой [Устинова, 1955], не претендуют на приоритет в присвоении названий, а лишь отражают ту или иную традицию именованья, сложившуюся задолго до публикации. Вопрос о том, какое из названий было первым, зачастую не имеет смысла – установить это сейчас уже невозможно.

Поэтому при выборе основных названий для гейзеров и других достопримечательностей принимались во внимание несколько факторов: приоритет названия, данного первооткрывателем (или первого опубликованного названия), сложившаяся практика употребления, а также мнение специалистов, прежде всего, научных сотрудников Кроноцкого заповедника и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Созданный каталог был рекомендован к печати Ученым советом Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и научно-техническим советом ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник» [Леонов, 2012б], [Леонов, 2017], таким образом, были урегулированы имевшиеся разночтения в именовании объектов и создана надежная основа для дальнейшей работы.

Составление списка гейзеров. Гейзер – это периодически извергающийся кипящий источник: *«...гейзеры представляют собой особый вид кипящих (пароводяных) источников, которые, в отличие от последних, периодически извергают горячую воду и пар выше поверхности земли. Режим их действия может быть охарактеризован последовательной сменой стадий излива воды, извержения (фонтанирования) пароводяной смеси, выделения пара (парения) и стадии полного покоя»* [Сугробов и др., 2009, с. 6].

Извержение не всегда выглядит как правильный, «классический» фонтан. Оно может напоминать выплески воды или пульсирующий излив, особенно у небольших гейзеров. У некоторых гейзеров может отсутствовать стадия излива. Иногда практически незаметна стадия парения, так как заливающаяся в канал гейзера холодная вода прекращает кипение.

Понятие «периодичности» не означает непременно строгой ритмичности, регулярности извержений. Режим работы у некоторых гейзеров нерегулярен, продолжительность стадий покоя и извержения может меняться от цикла к циклу в широких пределах (в несколько раз) практически непредсказуемым образом.

Принципиальным в определении гейзера является наличие периодов покоя в его деятельности, самопроизвольных перерывов в работе. Если извержение горячей воды и пара происходит непрерывно – это не гейзер, а пульсирующий источник.

На практике, разница между пульсирующим источником и гейзером с коротким периодом покоя субъективна. Еще Т. И. Устинова отмечала: *«Многие источники представляют собой как бы переходные формы между двумя типами, и отнесение их к тому или иному типу до известной степени условно»* [Устинова, 1955, с. 34]. С. И. Набоко считала пульсирующими источниками те, у которых фаза покоя меньше минуты, а гейзерами – те, у которых фаза покоя больше минуты, подчеркивая при этом, что такое деление условно [Набоко, 1954].

Основная сложность при составлении списка гейзеров заключается в том, что режим работы кипящих источников меняется со временем. Эти изменения могут быть связаны с изменениями гидрометеорологической обстановки, сейсмичностью, изменениями морфологии рельефа и т. д. [Сугробов и др., 2009]. Например, гейзер Первенец при первых наблюдениях работал в режиме гейзера [Устинова, 1955], потом в режиме пульсирующего источника, затем снова в режиме гейзера, в 2007 г. был завален шестиметровым слоем отложений оползня, пробился через них и работал в режиме пульсирующего источника в 2008-2010 гг., а с 2011 г. снова работает в гейзерном режиме.

В созданных каталогах [Леонов, 2012б], [Леонов, 2017] к гейзерам отнесены все источники, описанные как «гейзер» хотя бы одним из изученных авторов, независимо от их современного состояния.

Написание составных названий. Использование прописной буквы в географических названиях регулируется действующими правилами русской орфографии и пунктуации: *«В географических названиях с прописной буквы пишутся все слова, кроме родовых понятий (остров, море, гора, область, провинция, улица, площадь и т. п.), служебных слов, а также слов года, лет, напр.: котловина Больших Озер, улица 1905 года, мыс Сердце-Камень... Нарцательные существительные в составных географических названиях пишутся с прописной буквы, если они употреблены не в своем обычном значении, напр.: Новая Земля, Огненная Земля (архипелаги), Большой Бассейн (плоскогорье), Золотые Ворота (пролив)... служебные слова, находящиеся в середине географических названий, пишутся со строчной буквы, напр.: Ростов-на-Дону»* [Правила..., 2007, с. 171-173]. В Долине гейзеров к родовым понятиям относятся, например, «площадка», «склон», «стенка», «гейзер», «источник», «котел», «скала», «ущелье» и т. д.

Таким образом, пишется: гейзер Верхний в Русле, источник Малахитовый Грот, склон Разноцветных Грифонов, ущелье Желтых скал, скалы Триумфальные Ворота, скала Царевна-Лягушка и т. д.

Название «Долина гейзеров» зафиксировано в Русском орфографическом словаре (2004 г.) и Большой советской энциклопедии (1971 г.), распространено в литературе. При этом известен также вариант написания «Долина Гейзеров». Выбор между этими вариантами, по сути, заключается в следующем: подчеркивать ли в названии объекта, что в этом месте расположены именно гейзеры (Долина гейзеров), или же воспринимать это имя собственное как условное название целого комплекса природных достопримечательностей (Долина Гейзеров). «Правильного» ответа здесь нет – это вопрос предпочтений. Необходимо, однако, признать, что Долина гейзеров известна в мире, прежде всего, благодаря гейзерам, а все прочие достопримечательности имеют второстепенное значение для мировой популярности этого места. Поэтому автором принято написание «Долина

гейзеров», которое соответствует словарному варианту и большинству публикаций.

Передача названий на английском языке. Стандартов или хотя бы общепринятых правил передачи имен собственных с русского языка на иностранные языки не существует [Ермолович, 2009]. Это относится, в том числе, и к русским топонимам, принципы передачи которых *«различны в зависимости от того, связано ли это с переводом связных текстов или с выполнением других задач»* [Ермолович, 2009, с. 35]. На практике, способ передачи имени собственного выбирается переводчиком с учетом индивидуальной ситуации. Приоритетом является традиционное соответствие, а если его нет – то либо практическая транскрипция, либо смысловой перевод.

В данной работе основным способом передачи имен собственных выбрана практическая транскрипция. Исключение составляют те объекты, названия которых имеют традиционное соответствие на английском языке.

В то же время, по мнению автора, в ряде случаев можно использовать двойную передачу названий на иностранном языке: транскрипцию как основной вариант и смысловой перевод как дополнительный вариант. Все авторы, вслед за Т. И. Устиновой, старались давать гейзерам и другим достопримечательностям Долины гейзеров «говорящие» названия, которые подчеркивают какую-то характерную черту объекта, передают особенности его внешнего вида или режима работы. Названия большинства объектов соответствуют визуальному впечатлению и хорошо запоминаются. Представляется важным сохранить это качество при передаче названий на иностранном языке, по крайней мере, для целей экотуризма и экологического просвещения.

Существует несколько систем транслитерации (практической транскрипции) с русского языка на английский. В массовом использовании сегодня, по-видимому, наиболее популярны упрощенные версии системы транслитерации BGN/PCGN [Система..., 1944], [Система..., 1947],

отличительным признаком которой является передача «й» как «у». Эту систему с различными упрощениями используют Госдепартамент США, Google Maps и Google Earth, Википедия, Московский метрополитен и др.

В данной работе использована система транслитерации BGN/PCGN с упрощением (опускаются «'» и «'»), соответствующие «ь» и «ъ»).

При передаче составных названий на английский язык каждое слово, кроме предлогов и артиклей, пишется с прописной буквы (включая родовые названия). При передаче названий, включающих мемориальный антропоним (то есть имя того, в честь кого назван объект), используется транскрипция антропонима в исходной форме в начале соответствия: Третьяковская галерея – the Tretyakov gallery, завод им. Хруничева – the Khrunichev plant [Ермолович, 2009].

Результаты. Таким образом, в ходе работы было проведено полевое обследование, анализ литературных данных и систематизация названий основных объектов в районе Долины гейзеров. Основным результатом работы стало согласование названий гейзеров, горячих источников, грязевых и водных котлов, паровых струй, термальных площадок, склонов и стенок, озер, водопадов, скал и других достопримечательностей в районе Долины гейзеров. Создан электронный каталог основных объектов Долины гейзеров, который включает описания, фотографии и схемы расположения 127 объектов [Леонов, 2012б], а также каталог гейзеров Кроноцкого заповедника, включающий описание более чем 150 гейзеров и кипящих источников – как существующих, так и утраченных [Леонов, 2017].

2.2.5 Разработка интерактивного 3D-приложения на основе виртуального глобуса

На основе виртуальной 3D-модели территории, внедренной на виртуальный глобус, и электронного каталога объектов была создана интерактивная 3D-презентация «Виртуальная Долина гейзеров», которая обеспечивает свободный доступ к виртуальной модели территории и

информации о достопримечательностях. Презентация связана с базой данных, дополнена интерактивными элементами и виртуальными 3D-моделями различных объектов, рисунки 2.26-2.27.

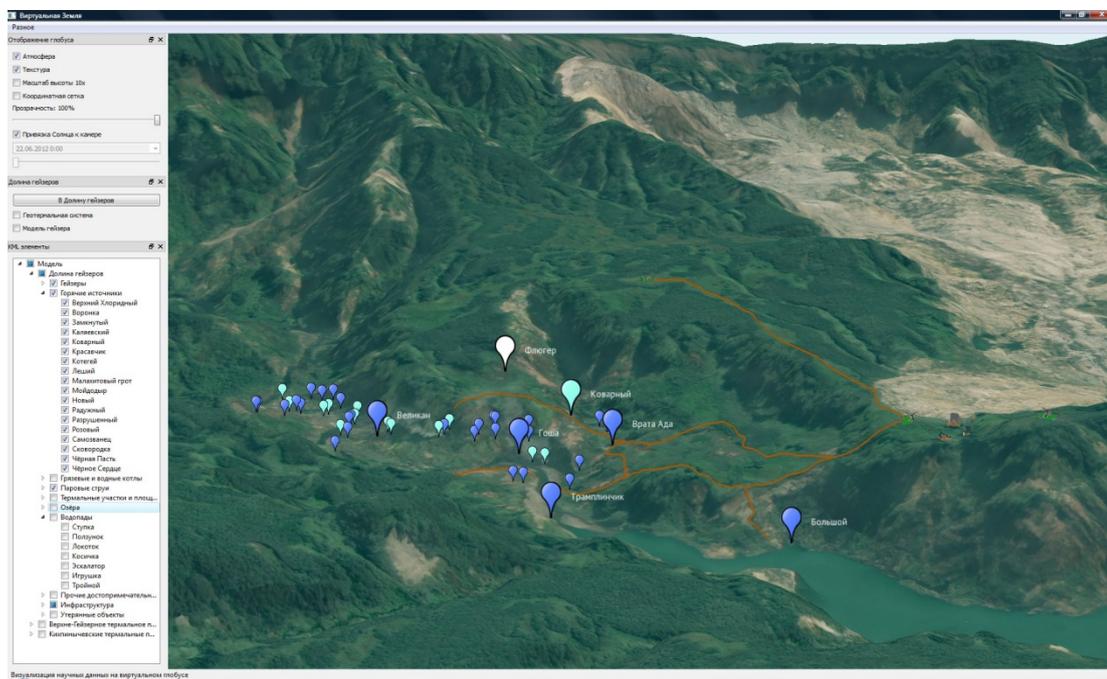


Рисунок 2.26 — Виртуальная 3D-модель Долины гейзеров, центральная часть, интерактивная 3D-презентация на основе OpenSceneGraph

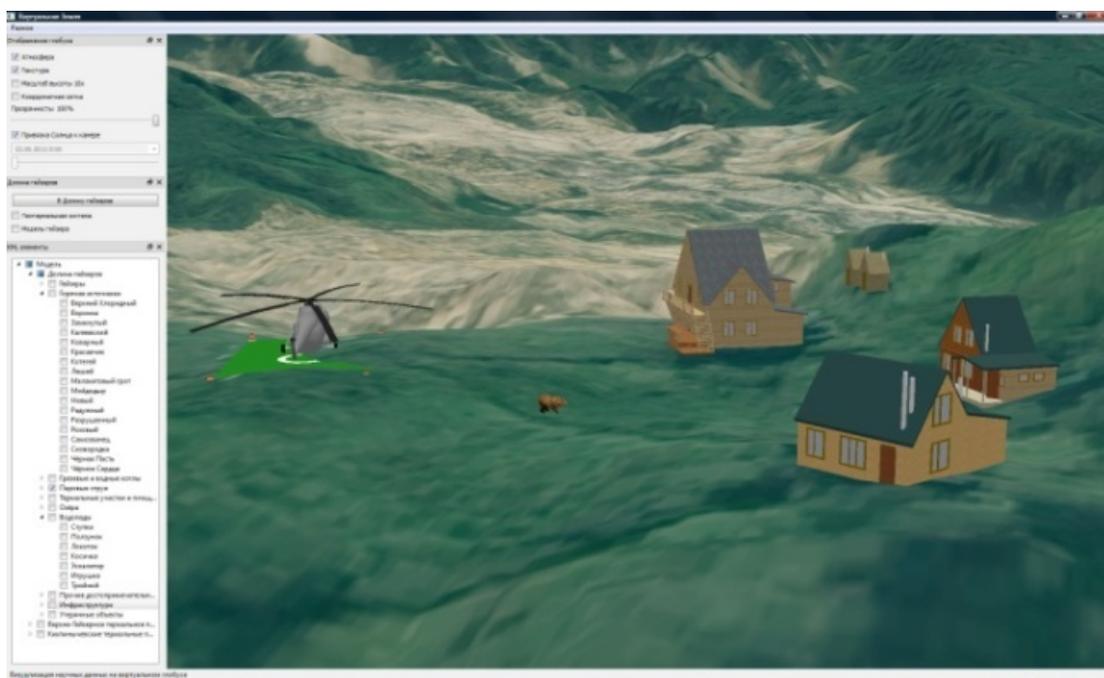


Рисунок 2.27 — Виртуальные 3D-модели дополнительных объектов, добавленные с целью повышения реалистичности

В презентацию была также добавлена 3D-визуализация подземных данных, выполнена анимация принципиальной схемы устройства геотермальной системы и скважинной модели работы гейзера, рисунки 2.28-2.29. [Алейников и др., 2011].

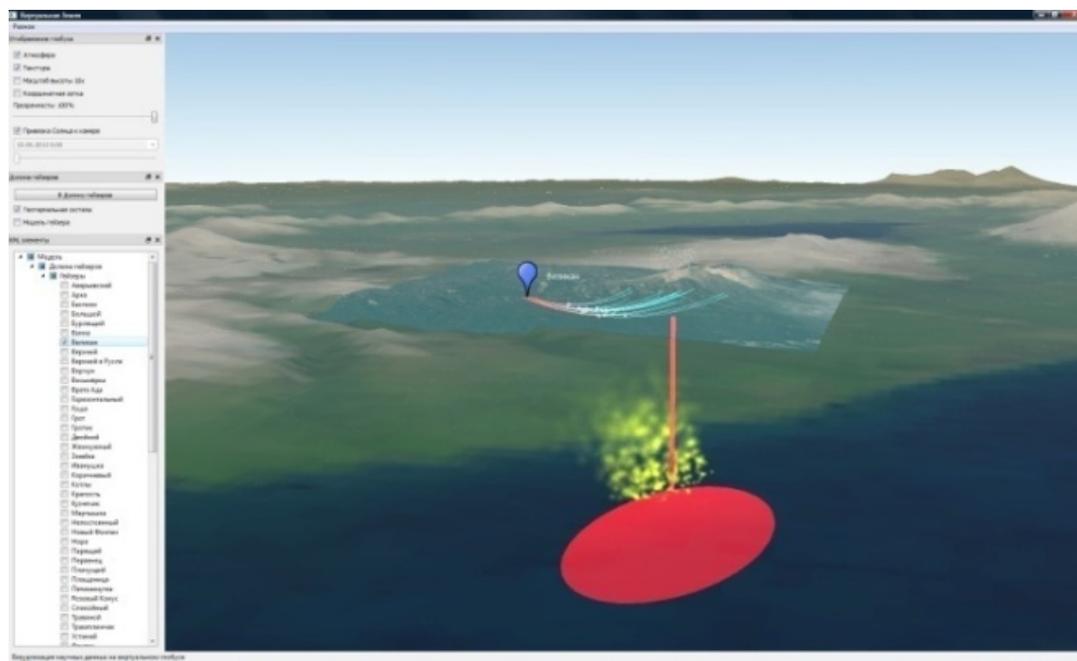


Рисунок 2.28 — Принципиальная схема геотермальной системы, анимированная виртуальная 3D-модель.

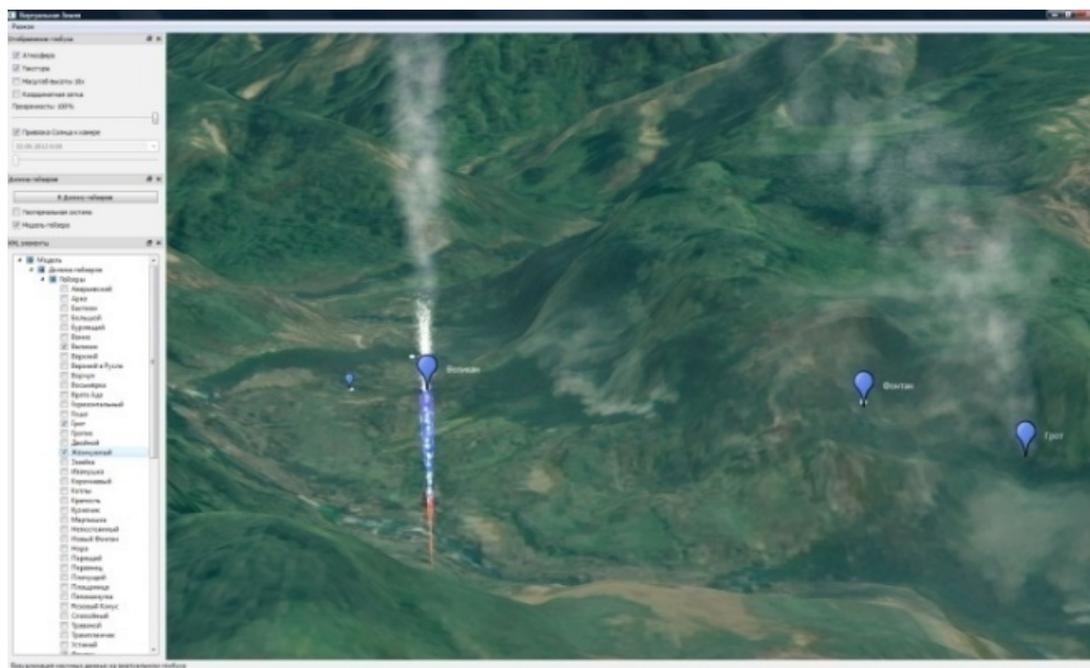


Рисунок 2.29 — Скважинная модель работы гейзера, анимированная виртуальная 3D-модель.

2.2.6 Сравнение с аналогичными работами

Создание 3D-моделей природных и рукотворных объектов с характерным размером в несколько километров («километровый» масштаб) является одной из наиболее сложных задач в сфере 3D-документации. Разрешение космических данных ДЗЗ в этом случае, как правило, недостаточно для создания объемной модели приемлемой точности, применение аэрофотосъемки и авиационного лазерного сканирования бывает затруднено по техническим и экономическим причинам, а для наземных 3D-сканеров этот масштаб слишком велик.

Оптимальным методом для создания детальной 3D-модели «километрового» масштаба является применение авиационных технологий ДЗЗ: аэрофотосъемки и авиационного лазерного сканирования. В случае, когда это возможно технически и экономически, результатом является высоко детализированная, точная и фотореалистичная модель территории дециметровой точности. Например, описано автоматизированное создание 3D-модели центральной части Берлина площадью 6,2 кв. км на основе матрицы высот с разрешением 7 см [Möser et al., 2009]. Интересен пример 3D-реконструкции каньона на о. Шпицберген, Норвегия размерами 7х3х0,8 км с разрешением 10-15 см с использованием лазерного сканера, размещенного на легком вертолете [Buckley et al., 2008].

В случае, когда применение авиационных технологий ДЗЗ невозможно, более экономичной альтернативой является использование данных космического ДЗЗ для реконструкции рельефа методами фотограмметрии (либо оцифровка топографических карт, созданных ранее методами фотограмметрии по данным космического или авиационного ДЗЗ), и 3D-моделирование зданий и сооружений с использованием специализированного программного обеспечения. Например, таким методом выполнена виртуальная реконструкция кампуса Гонконгского университета [Chen et al.,

2010], виртуальные реконструкции участков Великого китайского канала [Deng et al., 2008], [Mao et al., 2008].

Общим недостатком описанных методов является сложность организации массового доступа к модели, прежде всего, из-за большого объема, который занимают детальные и фотореалистичные 3D-модели. В общем случае, для этого требуется установка выделенного сервера или набора серверов, обеспечивающих многопользовательский доступ.

Наиболее экономичный способ – использование в качестве основы модели открытых данных ДЗЗ типа Google Earth. Например, описано создание на базе сервиса Google Maps открытого веб-портала для посетителей Олимпийских Игр 2008 года в Пекине [Ying et al., 2008]. При этом легко решается задача массового доступа к модели, также как и задача организации распределенной и дистанционной работы по развитию модели. Недостаток этого способа – грубая 3D-модель рельефа, используемая в Google Earth для большей части территории Земли (разрешение в плане 90 м, точность по высоте 20 м), и невозможность уточнения модели рельефа.

Таким образом, создание виртуальной модели территории «километрового» масштаба требует компромисса между точностью и детализацией модели, с одной стороны, и удобством организации удаленного доступа через интернет к этой модели, с другой стороны. Решения, принятые при создании 3D-модели Долины гейзеров, позволили обеспечить высокую точность модели, сравнимую с точностью аналогичных работ, при сохранении возможности обеспечения веб-доступа к ней.

2.2.7 Анализ и оценка новизны результатов

В результате проекта создана общедоступная виртуальная модель Долины гейзеров, которая может использоваться для задач научной визуализации, экологического образования и виртуального туризма. Подготовлены исходные данные (модель территории, каталог объектов,

стерео видеосъемка), обеспечено общедоступное представление этих данных (сайт, 3D-презентация).

Создан гибкий программный инструментарий для визуализации данных на виртуальном глобусе. Обеспечена возможность свободного развития этого инструментария за счет использования открытого программного обеспечения и общепринятых форматов данных.

Виртуальная модель территории, созданная в ходе выполнения проекта, является новой как по охвату и разрешению (280 кв. км. с разрешением цифровой модели рельефа 2,5 м и с разрешением спутникового покрытия 0,5 м), так и по точности привязки к мировой системе координат WGS84 (не хуже 0,5 м) [Леонов и др., 2011]. До выполнения проекта, в качестве крупномасштабной топографической основы для района Долины гейзеров исследователями использовались карты масштаба 1:2000 и 1:10000, созданные в 1970-х годах и не имеющие привязки к мировым координатам.

В ходе выполнения проекта впервые создан официальный каталог объектов Долины гейзеров. Каталог содержит современные фотографии и координаты всех основных объектов, названия объектов на русском и английском языках. До выполнения проекта существовал целый ряд описаний Долины гейзеров разных авторов, но все они описывали состояние объектов до оползня 2007 года и имели различия между собой. Каталог был единогласно одобрен и рекомендован к публикации Ученым советом ФГБУН «Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН» и Научно-техническим советом ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник» [Леонов, 2012б], [Леонов, 2017].

В ходе выполнения проекта впервые была выполнена документальная стерео видеосъемка достопримечательностей Долины гейзеров. До выполнения проекта, стерео видеосъемки камчатских гейзеров не существовало. Первая попытка стерео видеосъемки была предпринята в 2009 г. в рамках проекта РФФИ 09-07-02100-э_к, однако полученный стерео-материал оказался не удовлетворительным по качеству. В 2011 г. стерео

видеосъемка была выполнена заново на более современном оборудовании (видеокамера JVC GS-TD1BEU), отснято более 7 часов материала, на основе которого смонтировано 25 стерео видеофильмов о наиболее интересных гейзерах, источниках и других объектах. Стерео видеофильмы созданы в формате Stereo FullHD (2x1920x1080) в двух вариантах: с частотой кадров 25 и 50 кадров/сек. Фильмы выложены в общем доступе в сети Интернет (<http://valleyofgeysers.com/videos>).

Интерактивная 3D презентация «Виртуальная Долина гейзеров», разработанная в ходе проекта, представляет собой инновационный инструментарий визуализации и анализа данных [Алейников и др., 2011]. Она может использоваться как средство научной визуализации для эффективного междисциплинарного взаимодействия специалистов, изучающих данный район, а также как средство научного образования и экологического просвещения, в том числе школьного. Наиболее близким функциональным аналогом являются анимированные презентации на основе виртуальных глобусов типа Google Earth. Созданное приложение обеспечивает более широкую функциональность по сравнению с аналогами (показ подземных данных, использование произвольных моделей рельефа, отображение в стерео режиме и др.).

Все перечисленные выше результаты проекта представлены в открытом доступе в сети Интернет (www.valleyofgeysers.com), а также переданы в музей Кроноцкого заповедника (г. Елизово Камчатского края).

В целом, результатом проекта стало 3D-документирование крупного природного объекта и создание его виртуальной 3D-модели. Результаты проекта опубликованы не только в России, но и в ряде зарубежных изданий [Leonov et al, 2010], [Leonov et al, 2011]; [Leonov, Hobart, 2011], [Leonov, 2012]; [Leonov, 2013], [Leonov, Leonov, 2014], [Leonov, 2017].

2.3 Примеры применения разработанных подходов для виртуального 3D-моделирования технических и природных объектов

2.3.1 Электромобиль «Колумбия»

Электромобиль Columbia («Колумбия») 1901 г. выпуска – уникальный экспонат Политехнического музея в Москве [Карташев, 2016]. Он принадлежал императрице Марии Федоровне, матери последнего русского императора Николая II. Проект по виртуальному 3D-моделированию и виртуальной реконструкции электромобиля «Колумбия» был выполнен в 2015 г. в рамках сотрудничества между Политехническим музеем и Институтом истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН по направлению «Виртуальное наследие» [Рысь и др., 2015a], [Рысь и др., 2015б], [Рысь и др., 2016].

Целью проекта было восстановление исторического образа электромобиля в форме визуально реалистичной цифровой трехмерной модели. Проект позволил сохранить информацию о сохранившейся исторической части объекта, выполнить детальное историко-техническое исследование конструкции и виртуальную реконструкцию утраченных деталей, а также лучше подготовиться к физической реставрации объекта. Созданная 3D-модель может использоваться как виртуальный экспонат для демонстрации широкой публике, для этой цели было разработано интерактивное веб-приложение на основе WebGL.

Описание экспоната и исторической документации. Из 20 тысяч электромобилей, выпущенных фирмой Columbia, к настоящему времени сохранилось всего 24 (по частному сообщению, полученному автором от М. О. Карташева в 2013 г.), из них только два – в комплектации для императорских персон. Один из них принадлежал Александре Датской, королеве Великобритании и Ирландии, другой – ее младшей сестре, российской императрице Марии Федоровне, матери последнего российского императора Николая II. Автомобиль Александры в настоящее время хранится

в Национальном музее автомобилей (Бьюли, Англия), автомобиль Марии Федоровны – в Политехническом музее (Москва, Россия), рисунок 2.30.



Рисунок 2.30 — Электромобиль Columbia 1901 г. выпуска из коллекции Политехнического музея (отреставрирован в 2006 г.)

Экспонат в Политехническом музее имеет частичную сохранность: утерян двигатель, механические тяги (рулевого управления, управления скоростью вращения дифференциала, ручного тормоза), значительная часть электрической проводки, фонари освещения и другие детали. Кроме того, часть элементов являются новоделами, воссозданными в ходе реставрации 2007 г.: крылья, рычаг рулевого управления, складывающаяся крыша над пассажирским сиденьем и др. По оценкам специалистов Политехнического музея, большая часть новоделов сделана неудачно. Планируется повторная реставрация экспоната, однако, для выполнения реставрационных работ в

полном объеме необходимо дополнительное финансирование, поиск которого пока не увенчался успехом.

Чертежей или исторических фотографий данного экспоната не сохранилось. Единственное сохранившееся изображение близкого по конструкции электромобиля Александры Датской представлено гравюрой, выполненной по фотографии, которая была сделана ее дочерью принцессой Викторией [Harmsworth, 1902, фронтиспис], рисунок 2.31.



Рисунок 2.31 — Единственное сохранившееся изображение электромобиля «Колумбия» Александры Датской

В то же время, доступны исторические статьи об устройстве различных моделей электромобилей Columbia (включая фотографии, механические и электрические схемы, рисунки 2.32-2.33) [The Columbia..., 1897], [Columbia..., 1898a], [Columbia..., 1898b] любезно представленные Брюсом

Даффи (Bruce Duffie) в общем доступе на сайте <http://www.kcstudio.com/colindex.html>.

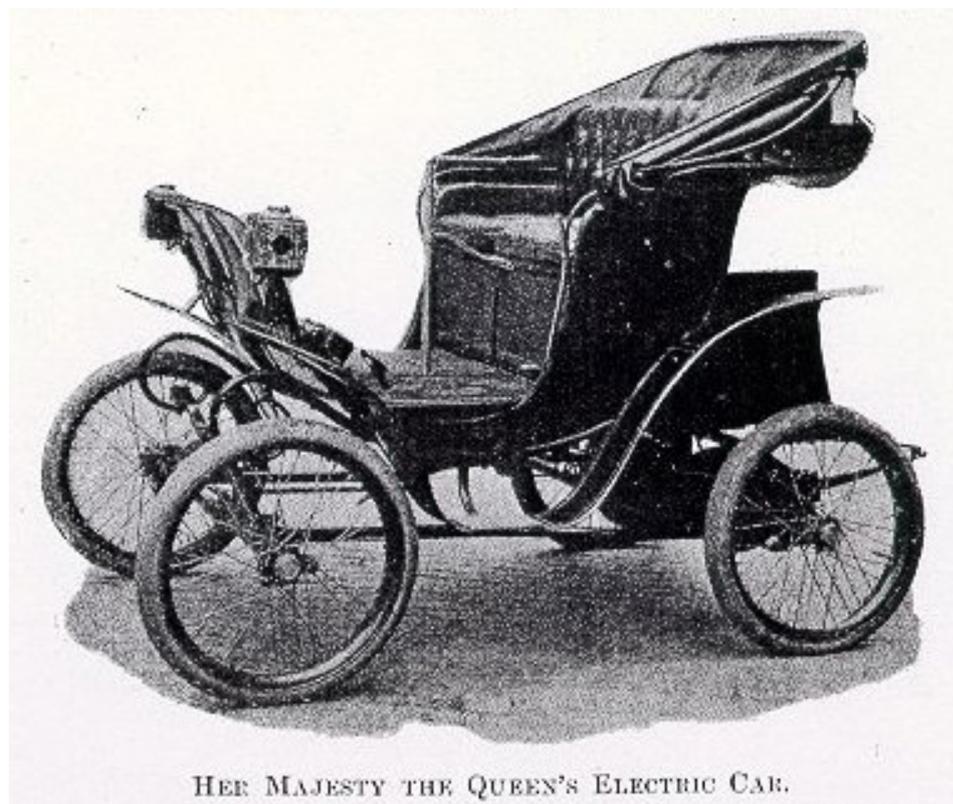


Рисунок 2.32 — Пример архивного изображения электромобиля «Колумбия»

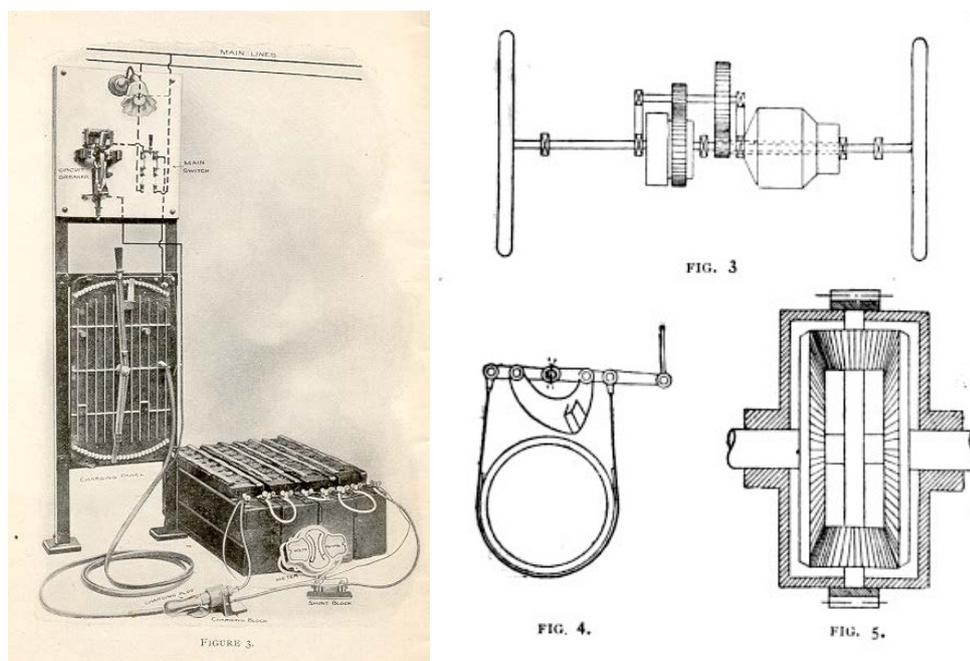


Рисунок 2.33 — Примеры архивных изображений элементов конструкции электромобиля «Колумбия»

Имеющаяся документация не дает полного представления об устройстве автомобиля. Чертежи и схемы той конкретной модели, которая находится в коллекции Политехнического музея, отсутствуют.

Актуальность виртуальной реконструкции. В связи с вышесказанным, высокую актуальность приобретает задача виртуальной 3D-реконструкции автомобиля. Виртуальная реконструкция позволяет решить ряд задач, непосредственно связанных с сохранением и изучением этого памятника истории техники:

1. Сохранить информацию о существующем состоянии экспоната (геометрия, структура, цвет и текстура поверхностей) в формате 3D-документа – наиболее современном формате научно-технической документации [Батурин, Леонов, 2013]. Создать метрически точную и визуально реалистичную виртуальную 3D-модель исторической части экспоната.

2. Выполнить детальное историко-техническое исследование конструкции, включая анализ механической и электрической частей; систематизировать информацию об элементах (как существующих, так и подлежащих восстановлению и/или замене); сравнить конструкцию объекта с аналогичными экспонатами и исторической документацией.

3. Восстановить в виртуальном виде утраченные элементы конструкции, проверить гипотезы об их пространственном расположении и устройстве. Для реконструкции утраченных деталей могут использоваться сохранившие чертежи и описания, а также фотографии и обмеры аналогичного экспоната в Англии, выполненные сотрудниками Политехнического музея.

4. Подготовиться к физической реставрации экспоната: проверить пространственную компоновку объекта с учетом реконструированных элементов, смоделировать взаимодействие деталей в трехмерном виртуальном пространстве, выявить недостаток данных для восстановления

каких-либо элементов или несоответствие имеющихся данных фактической геометрии объекта.

5. После проведения физической реставрации экспоната, его виртуальная 3D-модель может быть использована для контроля качества реставрации.

Кроме того, созданная 3D-модель может использоваться как виртуальный экспонат для демонстрации широкой публике. Виртуальная модель может быть представлена как в форме мультимедийной презентации в рамках музейной экспозиции (например, видеоролик или интерактивная 3D-модель на сенсорном экране), так и в форме Интернет-приложения на веб-сайте музея. Виртуальная модель позволяет дополнить экспозицию целым рядом возможностей, недоступных для физического экспоната:

1. Демонстрация нескольких вариантов конструкции объекта. Это актуально, например, в случае конкурирующих гипотез о его устройстве, выбор между которыми в настоящее время не может быть сделан ввиду недостатка данных, или в случае, когда объект существовал в нескольких модификациях. Физическая реконструкция позволяет воссоздать только один вариант объекта.

2. Демонстрация внутреннего устройства объекта. В традиционной музейной экспозиции, это достигается путем препарирования (например, вырезания «окон» в корпусе для демонстрации внутреннего устройства). Для ценных экспонатов препарирование не выполняется – таким образом, их внутреннее устройство остается недоступным для просмотра. Виртуальная модель позволяет отключать видимость любых элементов модели (например, корпуса).

3. Анимация объекта для демонстрации его действия. Например, на основе виртуальной модели можно показать работу механических систем электромобиля (рулевая, тормозная и т.п.), визуализировать работу электрической схемы.

Получение первичных данных: лазерное сканирование и фотосъемка. Первым этапом полевых работ стало фотографирование электромобиля. Серии снимков производились на фотоаппарат Canon 450D с объективом с фокусным расстоянием 50 мм. Съемка проводилась в несколько этапов:

1. Фотографирование с большого расстояния для получения минимально возможных перспективных искажений. Эти фотографии впоследствии использовались для создания ортофотографий, рисунок 2.34, и затем для полигонального 3D-моделирования.

2. Круговая фотосъемка объекта, на основе которой планировалось создать модель автомобиля методами фотограмметрии. Также эти снимки использовались при 3D-моделировании в качестве ориентира и в дальнейшем использовались для создания текстур модели.

3. Детальная фотосъемка для проработки мелких элементов методами фотограмметрии и полигонального моделирования.

Из-за неравномерного освещения павильона, в котором находится экспонат, практически все снимки были сняты с разными значениями выдержки для сохранения как можно большего количества информации в различных участках фотографий электромобиля. Снимки, снятые с одной точки, в последствие преобразовывались в один кадр с расширенным динамическим диапазоном [Reinhard et al., 2005] в программе Adobe Photoshop.

При детальном осмотре объекта выяснилось, что измерять геометрические размеры вручную при таком количестве мелких деталей нецелесообразно. В связи с этим, было решено применить лазерное сканирование, чтобы получить трехмерную точечную модель экспоната, которую можно будет использовать при полигональном моделировании для контроля геометрических параметров.

Съемка производилась при помощи лазерного сканера Leica P20, первичная обработка данных – при помощи программного обеспечения Leica

Syclone. Для доступа к днищу электромобиля были сооружены подиумы из деревянных палет, что позволило отснять детали, находящиеся под машиной, рисунок 2.35.

Машина была отснята в двух вариантах: с поднятой и с опущенной крышей. В результате была создана трехмерная точечная модель электромобиля, рисунок 2.36. Также была проведена съемка отдельных аутентичных запасных частей, в настоящее время находящихся вне машины (вольтметр и элементы тормозной системы).



Рисунок 2.34 — Ортофотоплан электромобиля, созданный из серии фотографий, отснятых параллельно плоскости проекции



Рисунок 2.35 — Выполнение лазерного сканирования электромобиля

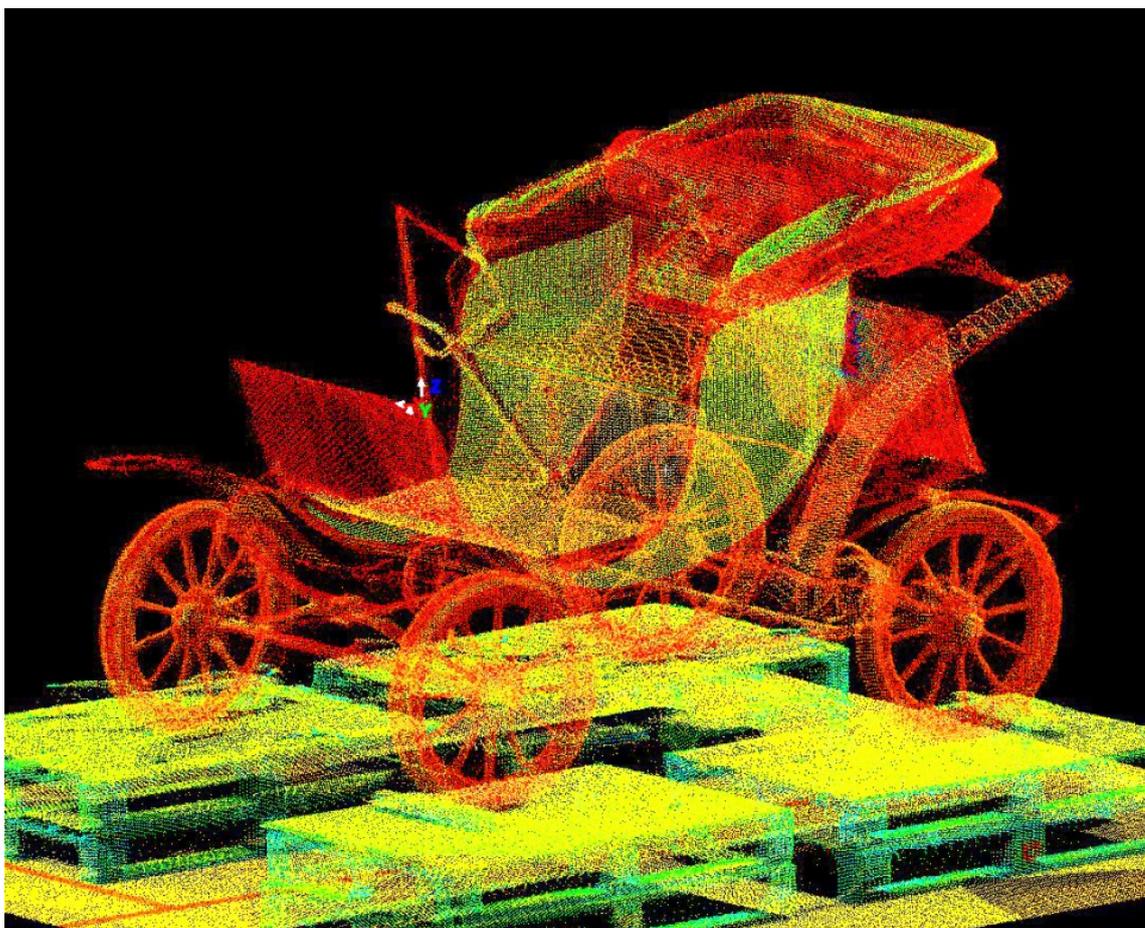


Рисунок 2.36 — Результат лазерного сканирования: точечная 3D-модель электромобиля (облако точек)

Методика 3D-моделирования. Получить модель всего электромобиля методом фотограмметрии оказалось невозможным в связи с большим количеством мелких деталей, зачастую перекрывающих друг друга. Поэтому, на основании первого этапа полевых работ и полученных результатов, была разработана следующая методика моделирования объекта:

- создание метрически точной 3D-модели сохранившейся исторической части объекта и отдельных элементов с использованием комбинации автоматизированных методов (лазерное сканирование, фотограмметрия) и ручного моделирования с приоритетом геометрической точности;

- визуально реалистичная реконструкция исторического образа объекта (включая внутреннее устройство) на основе сохранившейся документации с использованием ручного моделирования с приоритетом воссоздания исторически достоверного образа объекта.

Создание виртуальной 3D-модели. В результате моделирования была создана полная полигональная 3D-модель электромобиля, за исключением деревянной рамы днища и элементов электрической схемы (провода и переключатели, находящиеся под днищем автомобиля), рисунки 2.37-2.39. В ходе работ были также виртуально воссозданы недостающие элементы управления: главная рулевая тяга и тормозные механизмы задних колес, рисунки 2.40-2.41. При этом использовались архивные фотографии, фотографии аналогичного автомобиля из музея Бьюли, а также 3D-модели сохранившихся деталей тормозного механизма.

Уже на этом этапе были выявлены несоответствия, имеющиеся у отреставрированного автомобиля по сравнению с его изначальной конструкцией. Так, например, при реставрации 2007 года были перепутаны места крепления правой тяги и рукоятки тормозного механизма на оси, передающей усилие от рукоятки к тягам.

В виртуальной модели все детали смоделированы с учетом их взаимодействия, что позволяет использовать модель для демонстрации

принципов действия механизмов автомобиля. Создана 3D-анимация поворота передних колес автомобиля за счет управления рулевым рычагом.

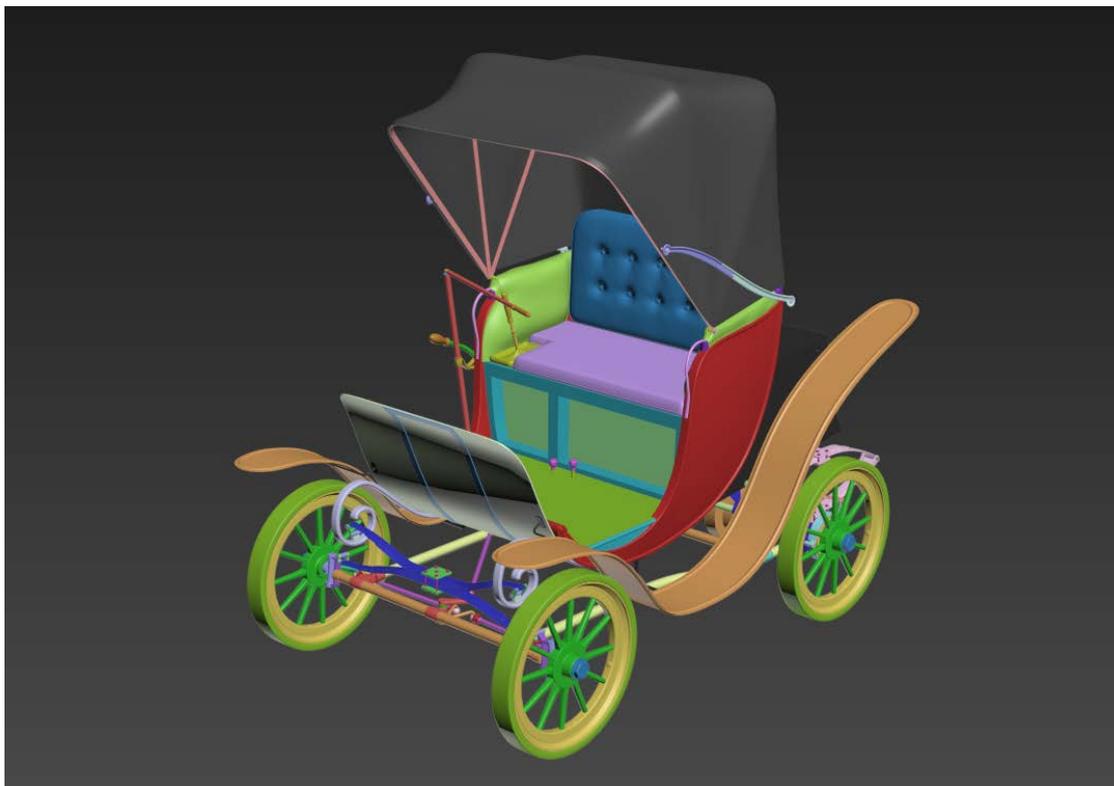


Рисунок 2.37 — 3D-модель электромобиля «Колумбия», общий вид

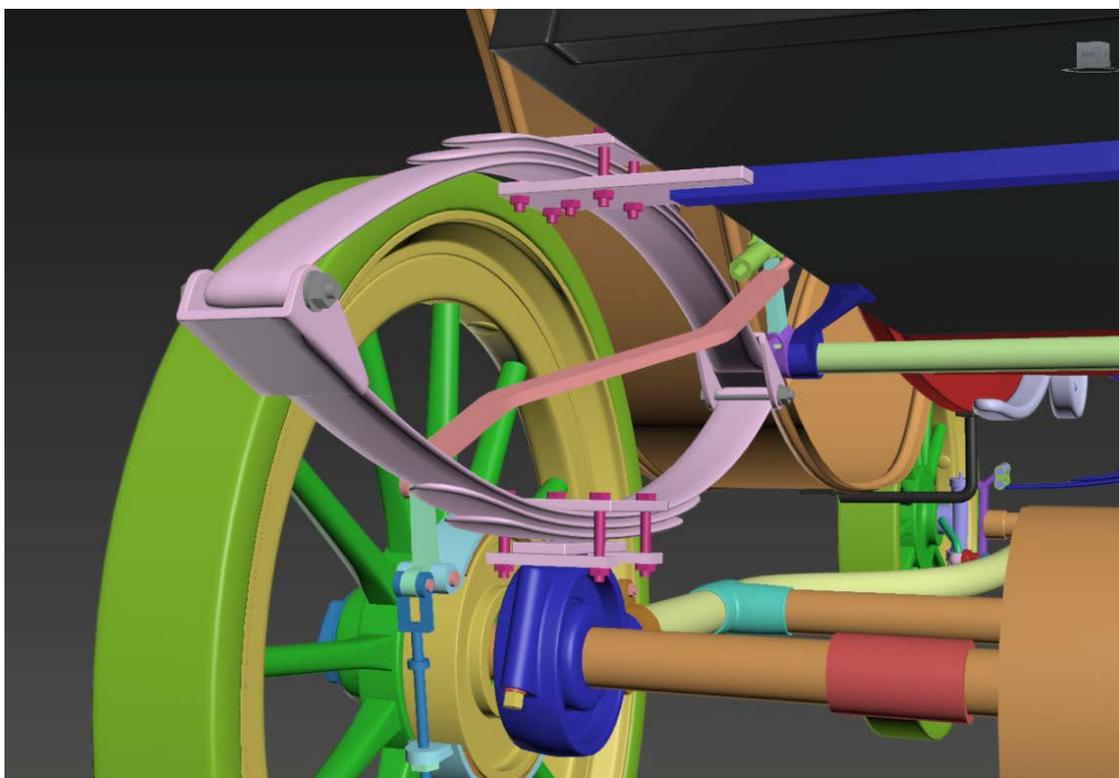


Рисунок 2.38 — 3D-модель электромобиля «Колумбия», элементы подвески



Рисунок 2.39 — Текстурированная 3D-модель электромобиля «Колумбия»

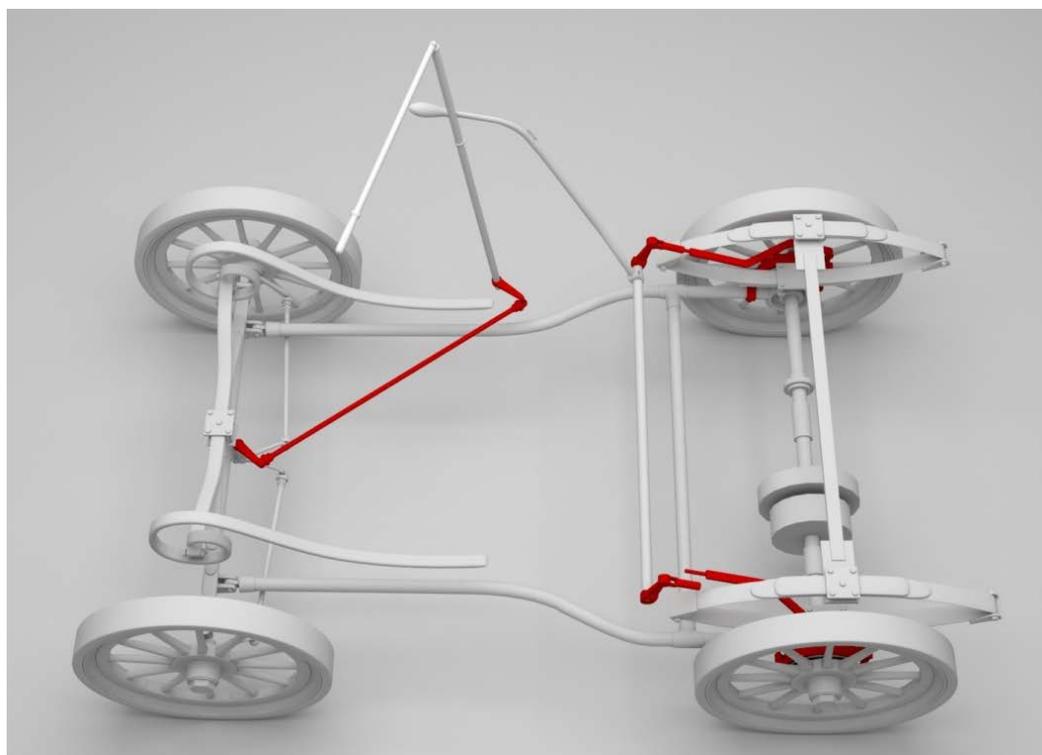


Рисунок 2.40 — Недостающие элементы, воссозданные виртуально в 3D-модели: главная рулевая тяга и тормозные механизмы задних колес

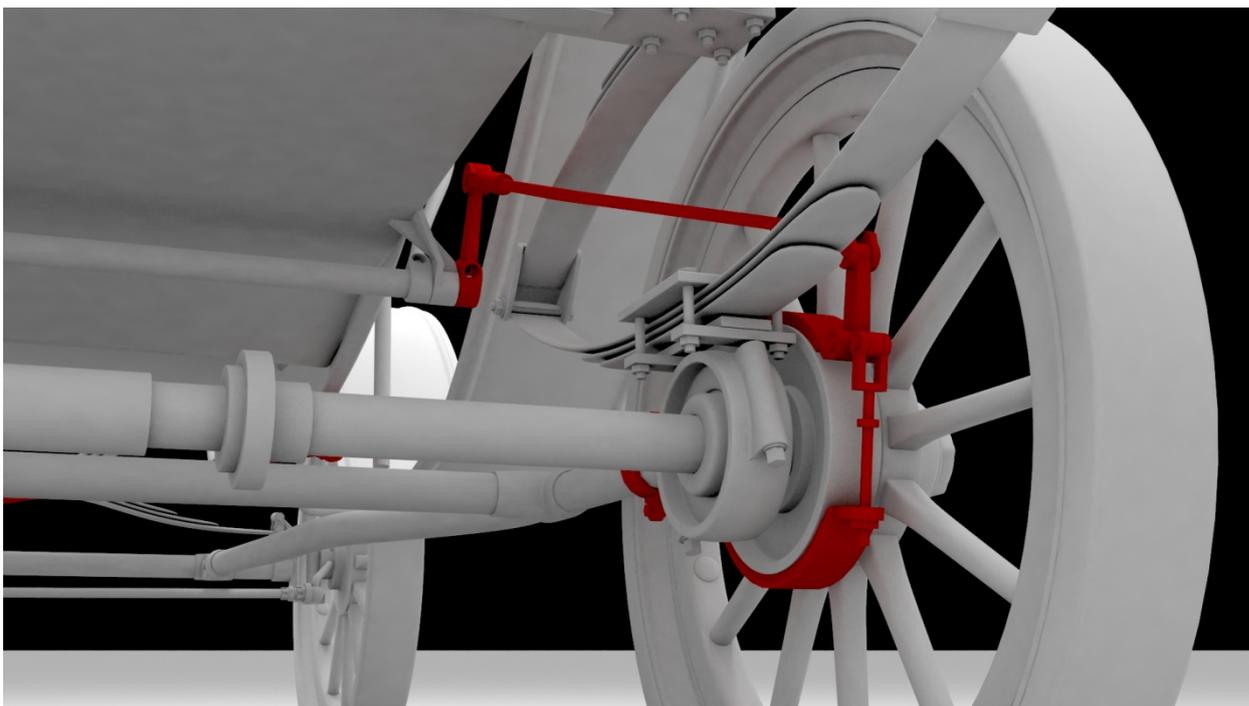


Рисунок 2.41 — Тормозной механизм, восстановленный с помощью 3D-моделирования имеющихся демонтированных деталей и фотографий аналогичного электромобиля из музея Бьюли

Таким образом, в результате работ была создана реалистичная 3D-модель электромобиля, в том числе с элементами виртуальной реконструкции утерянных элементов, а также выполнена анимация действия узлов автомобиля. Также создано веб-приложение, позволяющее просматривать созданную 3D-модель (см. описание в следующей главе).

Выводы. Использование комбинации современных методов сбора пространственной информации позволило осуществить виртуальную реставрацию, которая не является опасной для экспоната. Виртуальная 3D-модель, полученная в ходе работ, позволяет восстановить исторический вид автомобиля, продемонстрировать его устройство и принцип работы. Также эта 3D-модель может использоваться для подготовки к физической реставрации объекта (например, проверки сопряжения восстанавливаемых механических элементов, или визуализации воссоздаваемых текстур и элементов отделки).

2.3.2 Крейсер «Аврора»

Как отмечалось выше, в 2014-2016 гг. на крейсере «Аврора» проходил ремонт, в ходе которого была осуществлена, в том числе, реконструкция музейной экспозиции. Эта экспозиция расположена в шести помещениях крейсера, имеющих сложную геометрию, в т. ч. криволинейные стены, в связи с чем для эффективного планирования новой экспозиции требовалась точная трехмерная модель помещений.

Для создания такой 3D-модели в 2015 г. по заказу Центрального военно-морского музея было выполнено лазерное сканирование и 3D-моделирование шести помещений крейсера, где расположена музейная экспозиция. Сканирование и геометрическое 3D-моделирование помещений осуществили специалисты ООО «Триметари Консалтинг»; планирование музейной экспозиции на созданной геометрической основе было выполнено ООО «ПроСтиль» (С.-Петербург).

Также в 2015 г. по заказу ИИЕТ РАН было выполнено сканирование крейсера целиком (точнее, его большей части, оказавшейся доступной для сканирования на тот момент). Таким образом, удалось сохранить детальную информацию о геометрии крейсера по состоянию на 2015 г. [Леонов, Аникушкин, 2016], [Leonov, Anikushkin, 2016].

Лазерное сканирование крейсера «Аврора» было выполнено 6-10 апреля 2015 г. бригадой из двух специалистов. Использовались лазерные сканеры Leica ScanStation P20 и FARO Focus3D Multisensor, было сделано соответственно 74 и 125 скан-станций (точек установки сканеров). Для создания сети планово-высотного геодезического обоснования использовался тахеометр Sokkia. Предварительная сшивка данных, полученных сканером Leica, позволила сформировать трехмерную точечную модель объемом 2,8 млрд точек, с точностью сшивки в несколько сантиметров, рисунки 2.42-2.43. Относительно низкая точность сшивки обусловлена качкой корабля в процессе сканирования, а также его сложной геометрией.

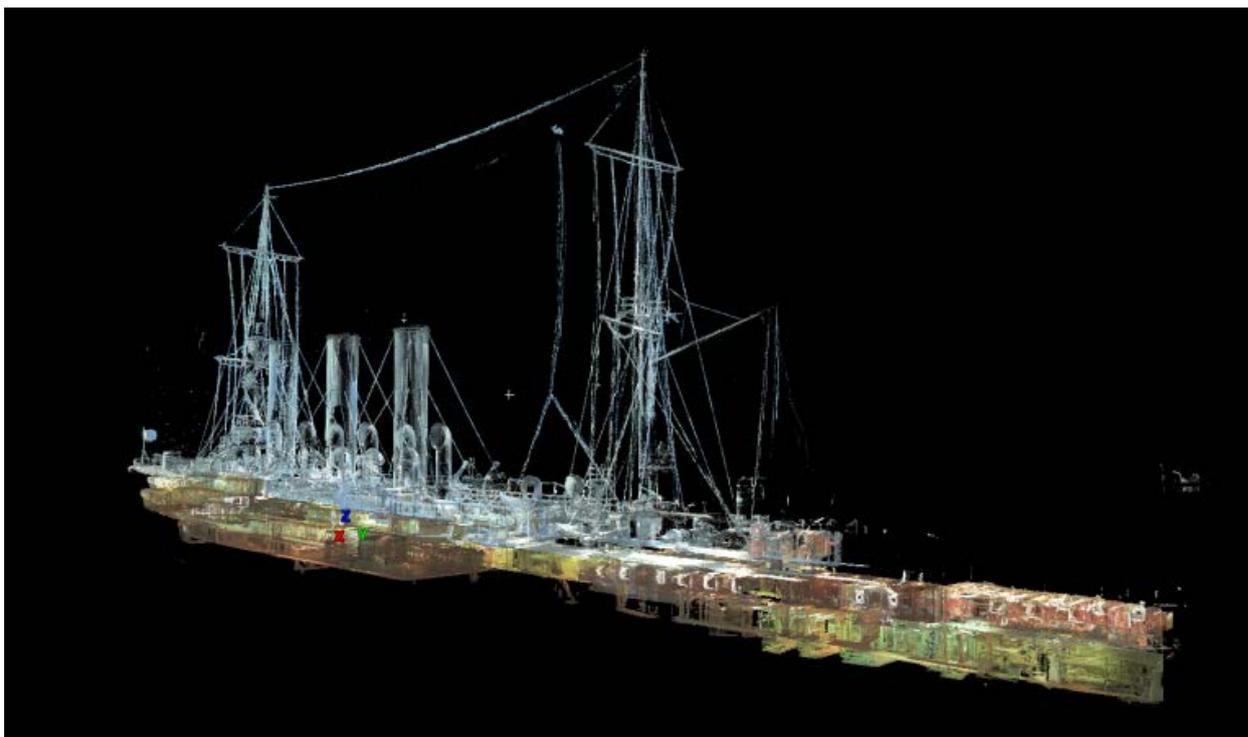


Рисунок 2.42 — Результат лазерного сканирования крейсера «Автора» (трехмерная точечная модель), 2015 г.

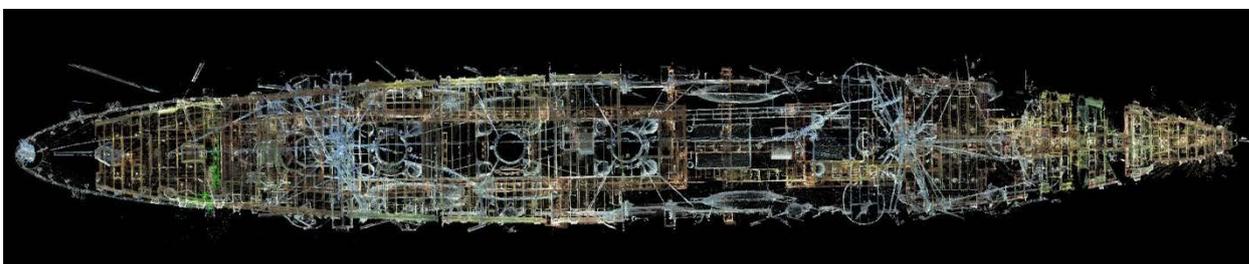
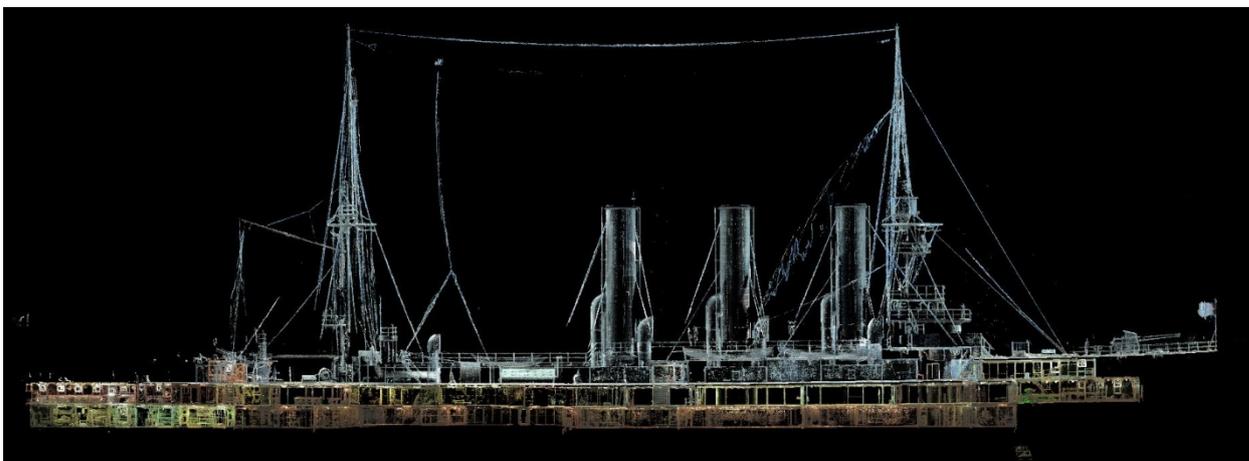


Рисунок 2.43 — Результат лазерного сканирования крейсера «Автора» (трехмерная точечная модель), 2015 г.

Криволинейная форма стен и сложная форма внутренних помещений стали основными причинами для выбора лазерного сканирования для 3D-

документирования крейсера. Сканер Leica ScanStation P20 с максимальной дальностью работы 120 м использовался для сканирования верхней палубы, капитанского мостика и длинных внутренних коридоров, рисунок 2.44. Для того, чтобы свести воедино 74 скана (2.8 миллиарда точек), использовались черно-белые поворотные магнитные мишени Leica HDS, а также бумажные мишени, установленные в местах пересечения сканов. Для этой цели по всему крейсеру было установлено более 200 мишеней.

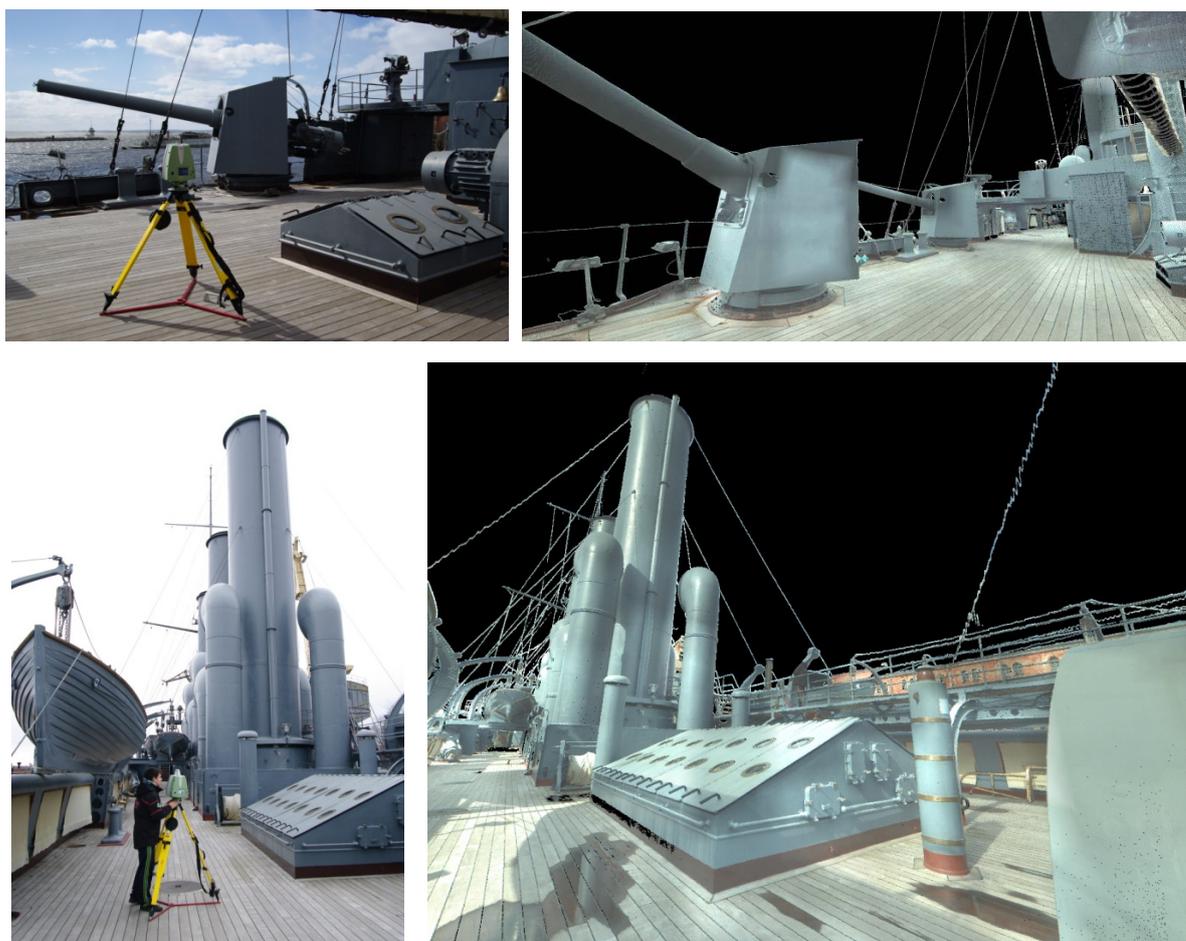


Рисунок 2.44 — Фотографии крейсера (слева) и соответствующие фрагменты точечной 3D-модели (справа). Фото М. Н. Аникушкина, 2015 г.

Сканер FARO Focus3D Multisensor использовался одновременно с Leica ScanStation P20 для сканирования отдельных частей верхней палубы, внутренних помещений, узких коридоров и лестниц. Этот компактный и легкий сканер позволил эффективно работать в тесных помещениях корабля. На дистанциях больше чем 40 м качество данных сканера Focus 3D было

несколько хуже, чем у сканера Leica P20, который продемонстрировал несколько большую стабильность данных на больших дистанциях. С помощью сканера Focus 3D было снято 125 сканов, которые планируется увязать с данными, полученными с помощью Leica P20. Образно говоря, данные, полученные с помощью Leica P20, позволили создать «скелет» корабля, к разным частям которого могут быть добавлены дополнительные данные, полученные с помощью сканера Focus 3D.

На основе полученных данных лазерного сканирования, было выполнено полигональное моделирование десяти помещений общим объемом 2140 куб. метров. Моделирование осуществлялось в программном пакете Blender3D и заняло около 45 человеко-дней, рисунки 2.45-2.46.

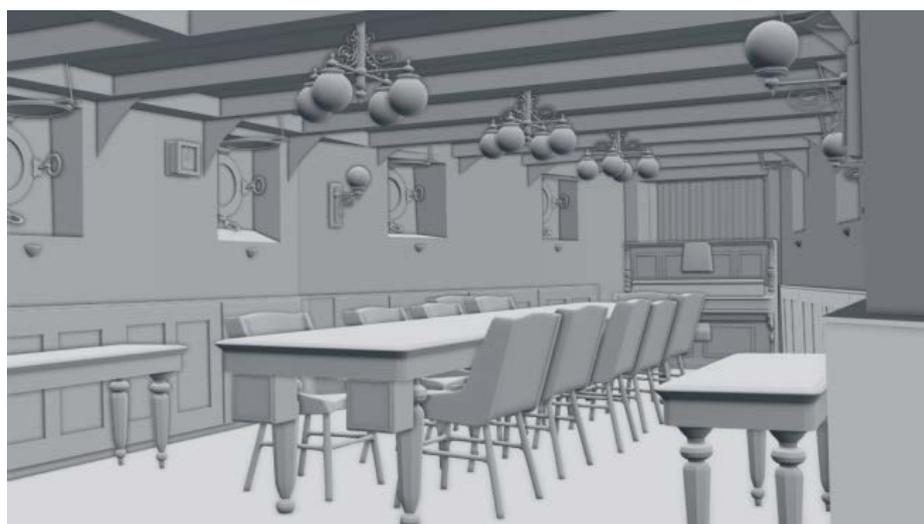
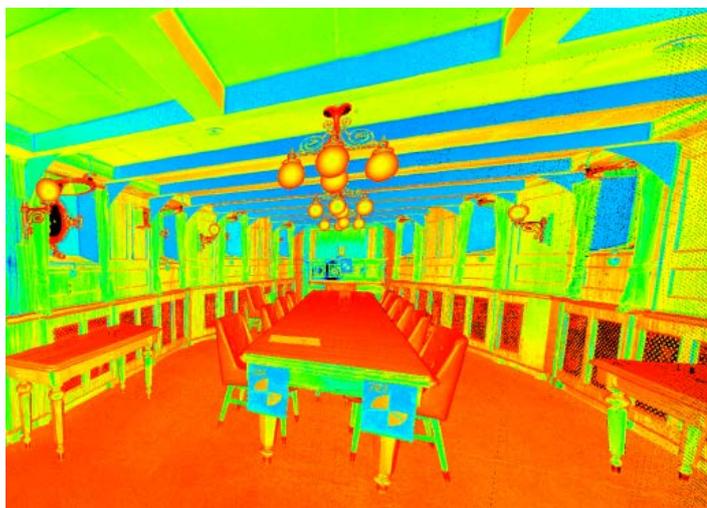


Рисунок 2.45 — Фрагмент точечной 3D-модели внутреннего помещения (вверху) и соответствующий ей фрагмент полигональной 3D-модели (внизу).

На основе созданной полигональной 3D-модели компанией ООО «ПроСтиль» (С.-Петербург) в интересах Центрального военно-морского музея было выполнено виртуальное 3D-моделирование и планирование новой музейной экспозиции. Для текстурирования 3D-моделей, проектирования экспозиции, освещения и расстановки экспонатов использовался программный пакет Autodesk 3DS Max, рисунки 2.46-2.49.

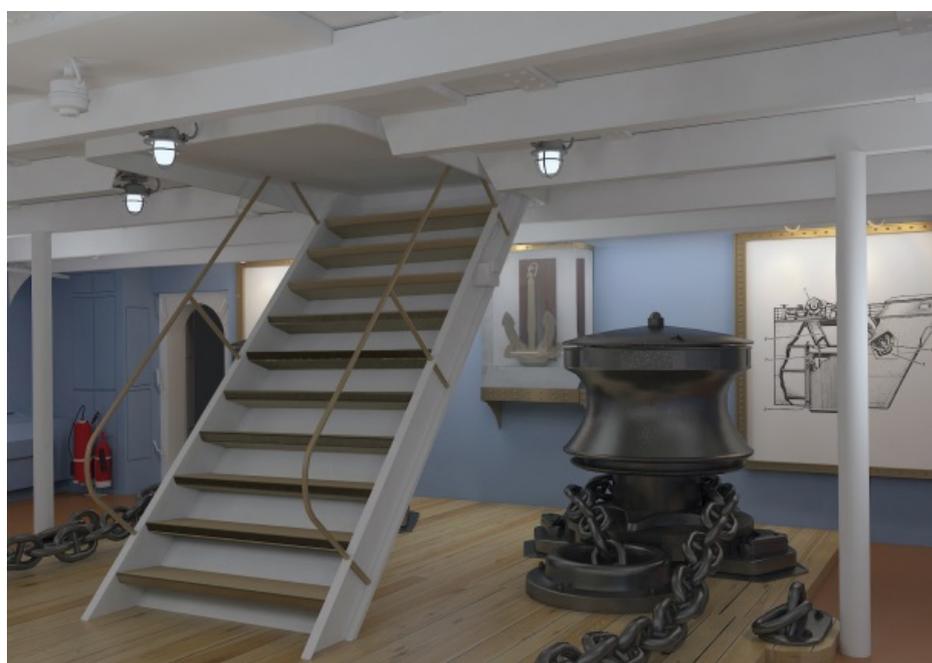
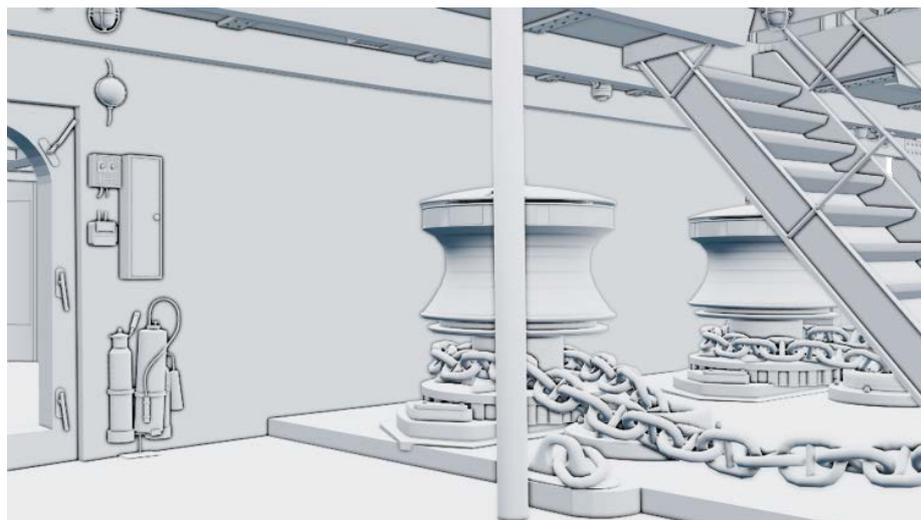


Рисунок 2.46 — Полигональная 3D-модель внутреннего помещения (вверху) и созданная на ее основе текстурированная 3D-модель с визуализацией освещения и добавленными моделями предметов экспозиции (внизу).



Рисунок 2.47 — Планирование музейной экспозиции. Текстурированная 3D-модель с визуализацией освещения и 3D-моделями предметов экспозиции.



Рисунок 2.48 — Планирование музейной экспозиции. Текстурированная 3D-модель с визуализацией освещения и 3D-моделями предметов экспозиции.

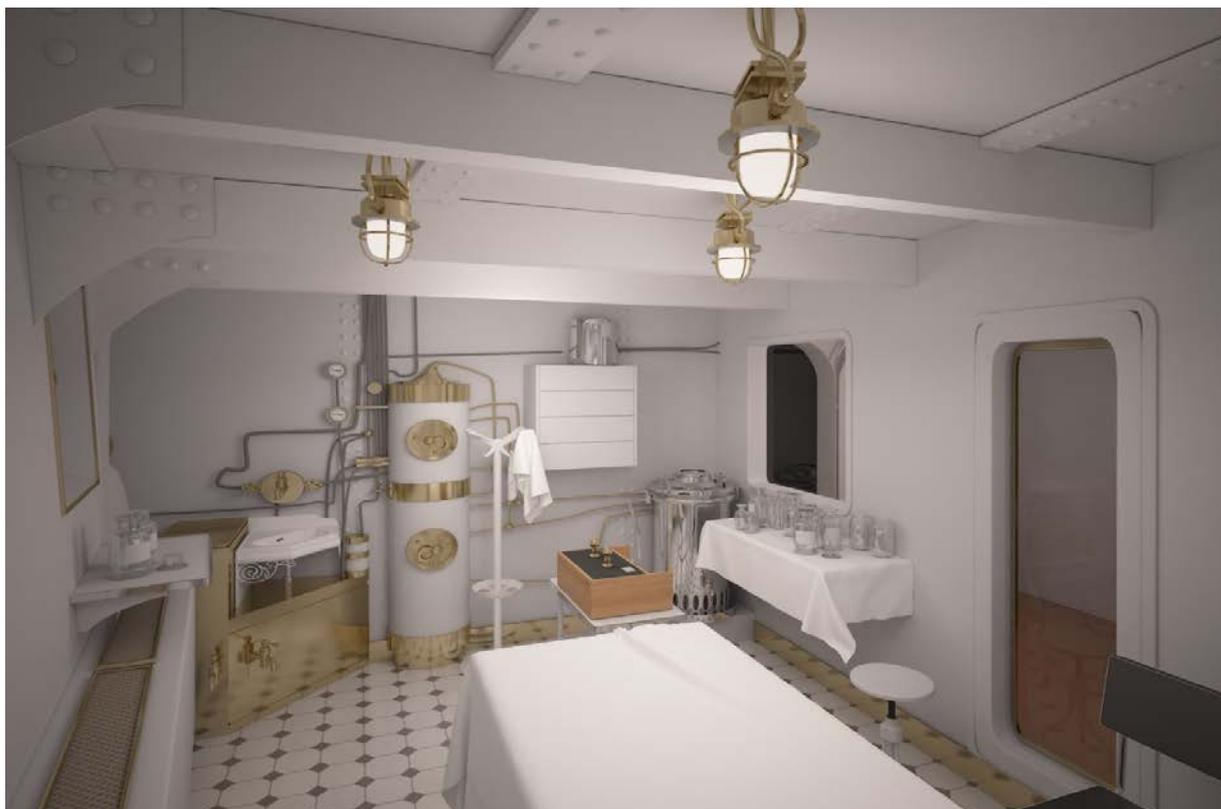


Рисунок 2.49 — Планирование музейной экспозиции. Текстурированная 3D-модель с визуализацией освещения и 3D-моделями предметов экспозиции.

Качка корабля привела к тому, что компенсаторы лазерных сканеров при сканировании выходили из допустимого диапазона, что привело к относительно низкой точности регистрации сканов, полученных с использованием сканера Leica P20. Точность регистрации не превышала несколько сантиметров. Попытки улучшить точность с использованием тахеометра Sokkia не были успешными по той же причине: из-за качки компенсаторы этого прибора также вышли из допустимого диапазона.

Безусловно, лучшего результата как по точности, так и по объему данных можно было бы добиться при сканировании корабля в сухом доке. При этом представилась бы уникальная возможность отсканировать подводную часть корабля снаружи. К сожалению, такая возможность не была предоставлена. В итоге, в результате проекта было отсканировано около 70% крейсера «Аврора», в том числе около 40% наружной части корпуса.

2.3.3 Скульптура «Родина-мать зовет!»

85-метровая скульптура «Родина-Мать зовет!» на Мамаевом кургане – не только архитектурный монумент, но и памятник техники. Конструкция фундамента и несущего каркаса разработана Н. В. Никитиным, главным конструктором Останкинской телебашни, и основана на схожем с Останкинской башней принципе. Внутри полой скульптуры натянуты 99 металлических тросов, поддерживающих жесткость каркаса.

По некоторым оценкам, с 1966 года идет постепенная деформация скульптуры, которая может в итоге вызвать ее разрушение. В частности, в 2009 году директор ФГУК «Государственный историко-мемориальный музей-заповедник „Сталинградская битва“» Александр Величкин сообщил на пресс-конференции, что с 1966 года фиксируется постепенное смещение верхней части скульптуры, которое к 2008 году составило в общей сложности 211 мм (при том, что в проекте автор монумента назвал критично допустимым отклонение скульптуры в 272 мм) [Родина-мать..., 2009].

Таким образом, актуальным является всестороннее сохранение информации о состоянии монумента, а также постоянный мониторинг геометрии железобетонной конструкции и анализ возникающих деформаций. Одним из способов такого мониторинга может быть периодическое лазерное сканирование скульптуры.

Лазерное сканирование и 3D-моделирование. Лазерное сканирование скульптуры «Родина-Мать» было выполнено ООО «Триметари Консалтинг» в декабре 2015 г. по заказу ООО «ДЛ Групп» (Н. Новгород, <http://www.dreamlaser.ru/>) [Леонов, Аникушкин, 2016].

Трехмерная модель скульптуры была необходима заказчику для планирования видеомэппинга (3D Mapping – проецирование изображений на объект с учетом его геометрии) в ходе подготовки шоу к 70-летию победы в Великой Отечественной войне. По просьбе ИИЕТ РАН, заказчик работ дал разрешение на использование полученных данных также в научных целях.

Лазерное сканирование скульптуры «Родина-Мать зовет!» было выполнено 6-7 декабря 2015 г. бригадой из двух специалистов. Использовался лазерный сканер Leica ScanStation C10, было сделано 11 скан-станций (точек установки сканеров), рисунок 2.50.



Рисунок 2.50 — Процесс сканирования скульптуры «Родина-Мать зовет!»

Общая площадь съемки составила 4 га. Для взаимного уравнивания (сшивки) использовались специальные марки-отражатели, средняя ошибка сшивки составила 5 мм. В результате сшивки данных была создана трехмерная точечная модель объемом 34 млн. точек, из которых 14 млн. точек приходится на саму скульптуру, рисунки 2.51-2.53.

Среднее расстояние между точками в трехмерной точечной модели составило: на лице скульптуры – порядка 12-17 см, на острие меча – порядка 20-25 см, в нижней части – 1-3 см. Необходимо отметить, что относительно низкая плотность точек в верхней части скульптуры определялась потребностями заказчика работ. При необходимости с использованием той же техники могли быть получены и более детальные данные.



Рисунок 2.51 — Точечная трехмерная модель скульптуры «Родина-Мать зовет!», полученная в результате лазерного сканирования (справа), фотография с похожего ракурса (слева, фото из интернета).

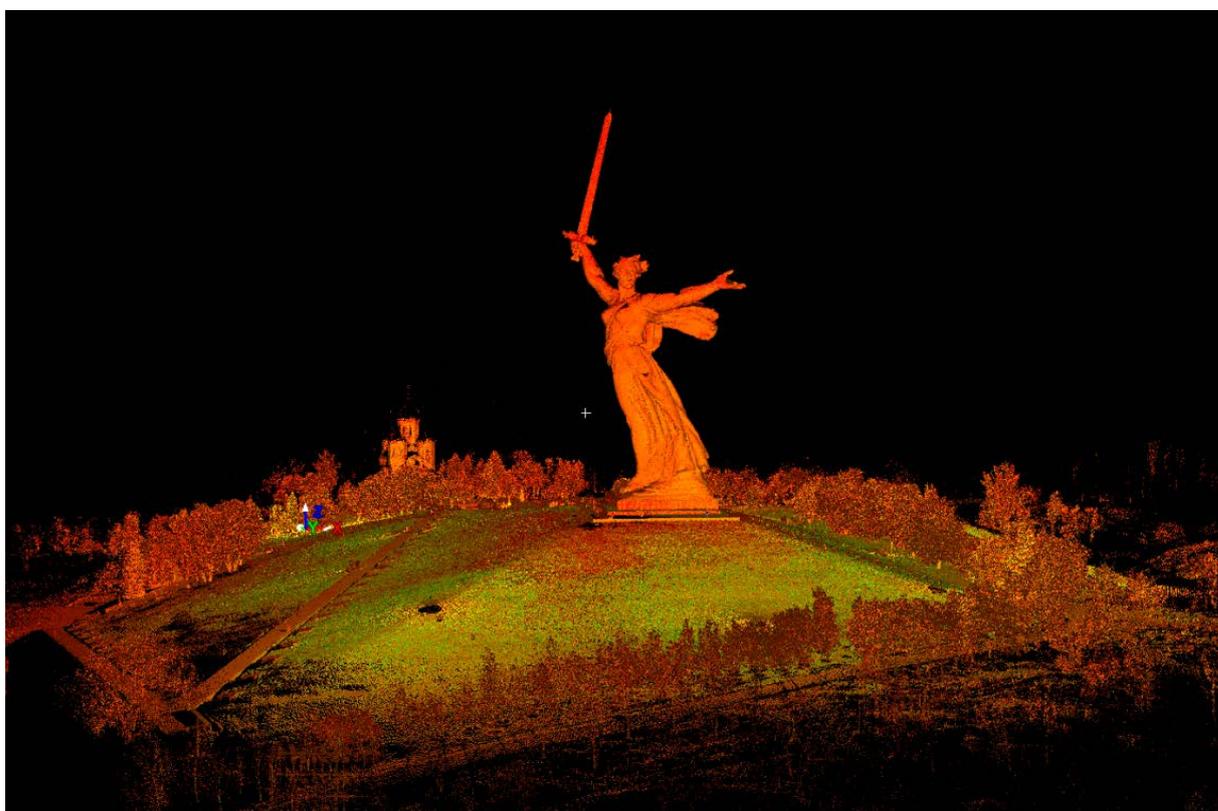


Рисунок 2.52 — Точечная 3D-модель скульптуры «Родина-Мать зовет!» и окружающей территории

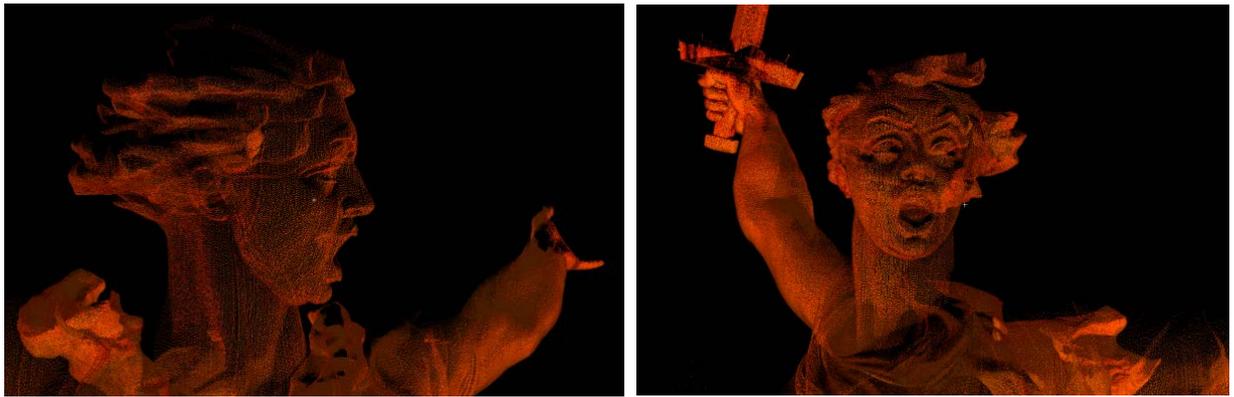


Рисунок 2.53 — Точечная 3D-модель скульптуры «Родина-Мать зовет!», фрагмент (голова статуи)

Сравнение с аналогичными работами. Сканирование скульптуры «Родина-Мать зовет!» уже выполнялось ранее, в 2010 году, ООО «Градиент» (Волгоград, <http://ooogradient.ru/projects>) с использованием лазерного сканера RIEGL LMS-Z420i. Перед сканированием была создана сеть отражающих опорных марок, которые закреплялись на конструктивных элементах памятника и на вехах вокруг него. Использовалось 5 точек стояния, сшивка сканов была выполнена с использованием программного обеспечения RISCAN PRO в условной системе координат, рисунок 2.54.

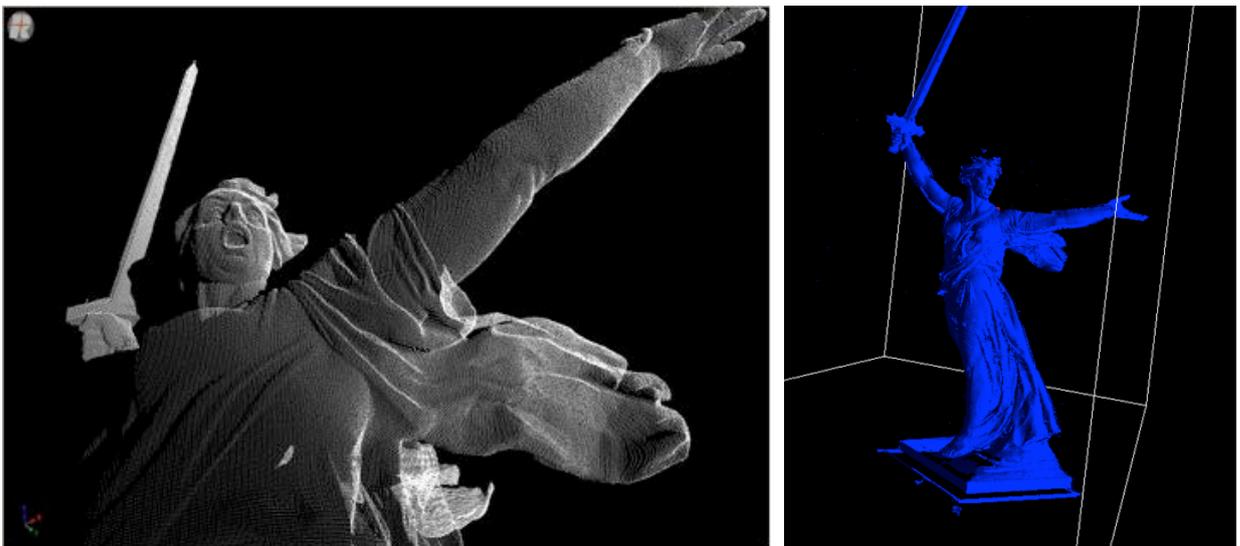


Рисунок 2.54 — Точечная 3D-модель, построенная по результатам лазерного сканирования. 2010 г. ООО «Градиент» (г. Волгоград)

По данным на сайте ООО «Градиент», полученная точечная 3D-модель имела среднюю плотность 4 точки на 10 кв. см. К сожалению, результаты 2010 г. оказались недоступны для анализа и сравнения с данными 2015 г. – по сообщению исполнителя работ, «утрачены».

Выводы. Пример с утратой данных лазерного сканирования скульптуры «Родина-Мать зовёт!» еще раз демонстрирует необходимость развития законодательной базы в области 3D-документирования. В частности, при проведении работ на объектах, которые являются памятниками науки, техники, архитектуры, объектами культурного наследия, необходимо обязать исполнителя работ передавать копию полученных первичных данных («облако точек» лазерного сканирования, сведения о геодезической привязке, отчет о выполненных работах) в соответствующий государственный архив (например, РГАНТД). Это гарантирует сохранение трехмерной информации для будущих исследователей, и даст возможность сопоставления 3D-данных, полученных в различное время.

2.3.4 Денисова пещера на Алтае

Целью проекта «Виртуальная Денисова пещера на Алтае» являлось создание виртуальных 3D-моделей пещеры и некоторых наиболее характерных находок, а также разработка программного обеспечения для интерактивной визуализации результатов археологических исследований в виртуальном пространстве модели. Помимо сохранения информации об уникальном природном и археологическом объекте, виртуальная 3D-модель Денисовой пещеры предназначена для решения ряда научно-практических задач. Проект является первым отечественным опытом виртуального 3D-моделирования пещерной палеолитической стоянки [Аникушкин и др., 2013], [Леонов и др., 2014].

Проект был выполнен Центром виртуальной истории науки и техники Института истории естествознания и техники РАН совместно с Институтом археологии и этнографии СО РАН при поддержке ООО «Триметари» в

рамках Целевой программы РАН «Развитие постоянно действующей выставки достижений РАН» в 2012 г.

Мотивация выполнения проекта. Многослойная палеолитическая стоянка в Денисовой пещере на северо-западе Горного Алтая является в настоящее время одним из наиболее перспективных археологических объектов для изучения древнейшей культуры человека и окружающей его природной среды на территории Северной Евразии. В колонке рыхлых отложений пещеры выделено более 20 литологических слоев, которые содержат археологический материал различных эпох – от среднего палеолита до позднего средневековья.

Коллекция находок из центрального зала, двух галерей и с предвходовой площадки пещеры насчитывает десятки тысяч предметов. Наиболее важные открытия связаны с изучением палеолитических слоев Денисовой пещеры. Научной сенсацией мирового уровня стали антропологические останки ранее неизвестного науке подвида человека, обнаруженные в слое начальной стадии верхнего палеолита [Krause et al. 2010].

Несомненную важность и актуальность представляет сохранение информации о Денисовой пещере как уникальном природном и археологическом объекте с использованием всего арсенала современных компьютерных методов, в частности, создание ее виртуальной (цифровой, компьютерной) 3D-модели.

3D-моделирование пещерных палеолитических стоянок с применением лазерного сканирования можно рассматривать как отдельное направление виртуальной археологии. Одна из первых работ такого рода была выполнена в 1994 г. Лазерный сканер был применен для создания текстурированной 3D-модели труднодоступной пещеры Коске во Франции [Thibault, 2001]. В дальнейшем были созданы 3D-модели пещер Араго во Франции, Гротта-деи-Церви в Италии, Парпальо [Lerma et al., 2010], Альтамира [Donelan, 2002],

Лас-Калдас, Пенья-де-Кандамо [González-Aguilera et al., 2009] в Испании, Вондерверк в Южной Африке [Rüther et al., 2009].

Детальный обзор проектов по моделированию пещерных палеолитических объектов будет приведен ниже. Этот обзор показал, что основная мотивация большинства работ – сохранение трехмерной информации о наскальных рисунках и гравировках в пещерах. Гораздо меньше внимание уделяется визуализации археологических находок в виртуальном пространстве созданных 3D-моделей. Такая задача была поставлена и успешно решена в рамках проекта «Виртуальная Денисова пещера на Алтае».

Лазерное сканирование и 3D-моделирование. В августе 2012 г. были выполнены лазерное сканирование и детальная фотосъемка пещеры. Сделано 37 сканов, полное облако точек составило около 50 млн. точек, рисунок 2.55.

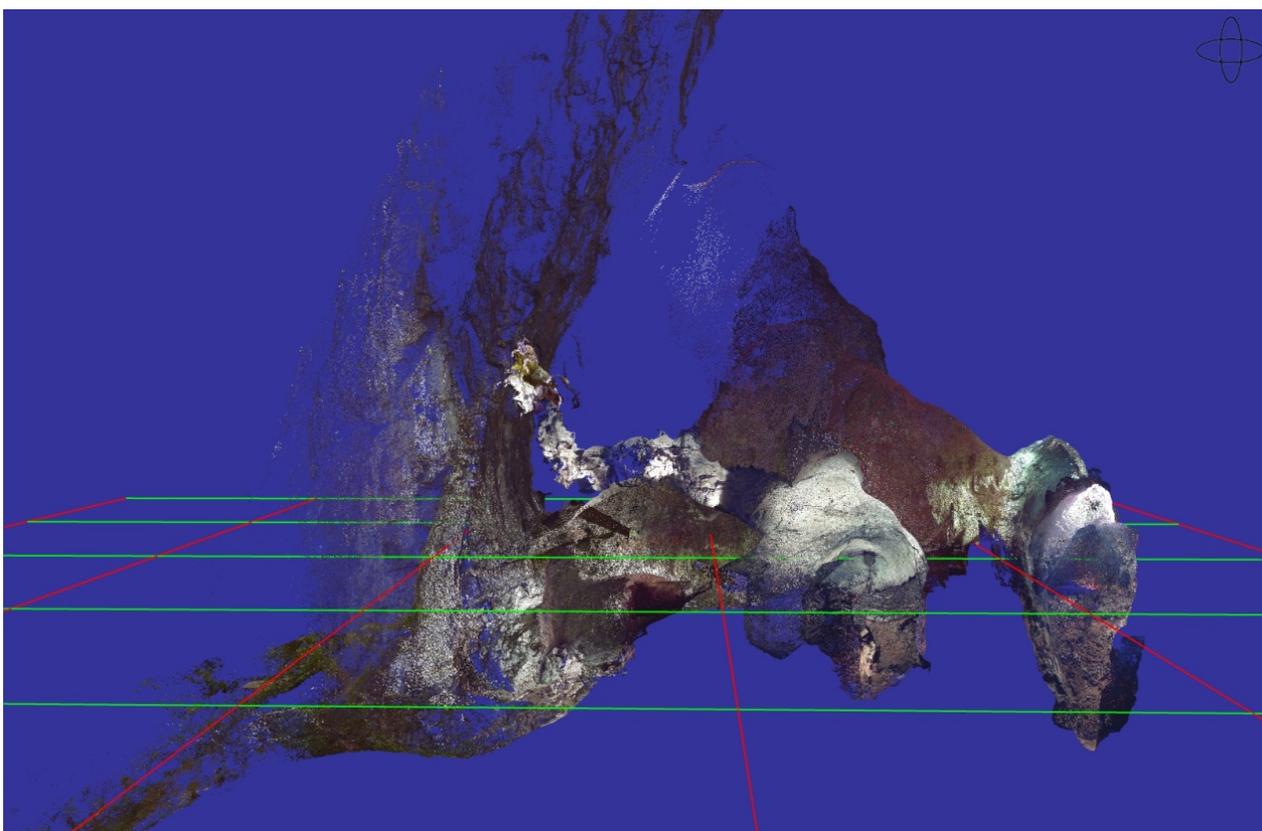


Рисунок 2.55 — Точечная 3D-модель Денисовой пещеры, общий вид с наложенной координатной сеткой (шаг сетки – 10 м)

Затем по результатам лазерного сканирования и фотосъемки была создана текстурированная полигональная 3D-модель пещеры. Эта 3D-модель содержит 88 254 полигона, из которых 86 000 полигонов приходится непосредственно на пещеру, а 2 254 полигонов приходится на искусственные объекты (настилы, перила, лестницы). Разрешение текстуры составляет для разных участков от 30 до 100 тыс. пикселей на 1 кв. м. поверхности модели.

Таким образом, была создана детальная виртуальная 3D-модель пещеры, которая фиксирует ее геометрию и внешний вид с высокой точностью, рисунки 2.56-2.58.

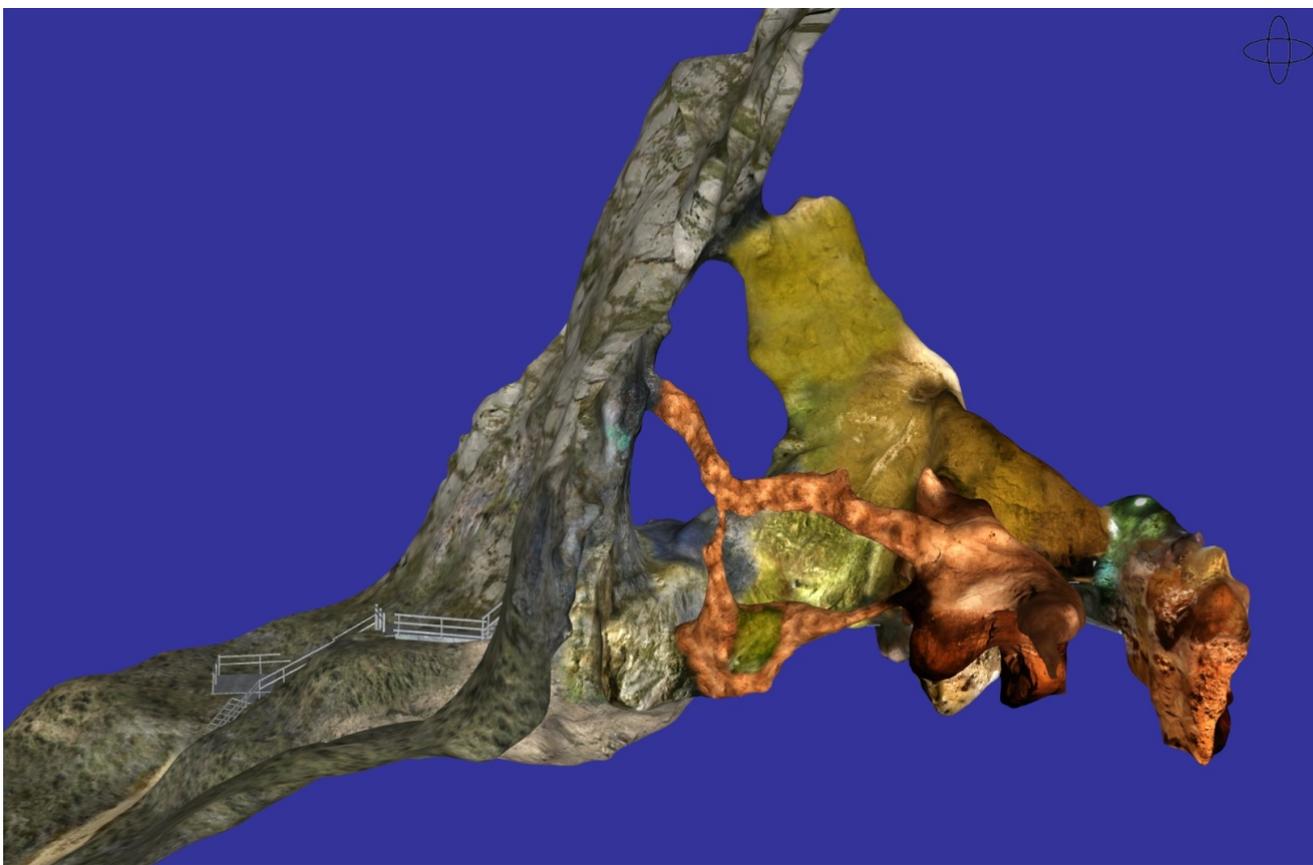


Рисунок 2.56 — Текстурированная полигональная 3D-модель Денисовой пещеры, общий вид



Рисунок 2.57 — Текстурированная полигональная 3D-модель Денисовой пещеры, фрагмент (предвходовая часть)



Рисунок 2.58 — Текстурированная полигональная 3D-модель Денисовой пещеры, фрагмент (центральный зал)

Созданная 3D-модель была привязана к археологической системе координат (АСК), используемой в процессе раскопок для фиксации местоположения находок. Ось ординат (Y) АСК повернута на 62° по часовой стрелке относительно направления на север по истинному меридиану, примерно совпадает с линией входа в пещеру и длинной осью центрального зала. Ось абсцисс (X) перпендикулярна оси ординат в плоскости, касательной к Земле в начале координат. Ось аппликат (Z) направлена вертикально вверх, дополняет систему координат до правой тройки. Началом координат АСК является условная точка в пространстве, расположенная неподалеку от капельной линии пещеры, рисунок 2.59.

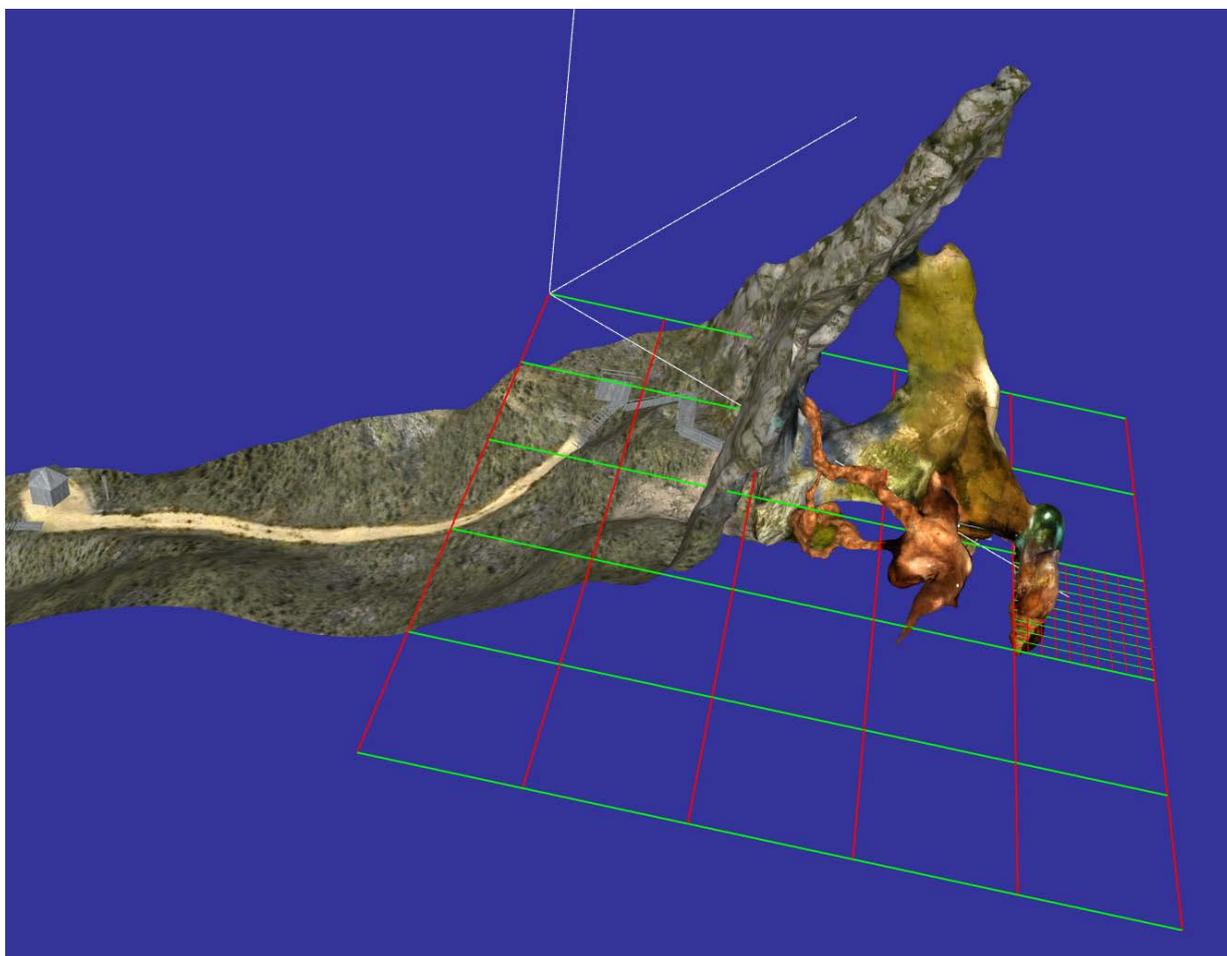


Рисунок 2.59 — Модель пещеры с наложенной координатной сеткой АСК.

Показано начало координат и направления на север и восток.

АСК зафиксирована на объекте при помощи серии реперов, закрепленных в коренной стенке пещеры. Все реперы были отсняты в ходе

сканирования. При обработке данных модель пещеры была переведена в координаты АСК, точность привязки составила около 5 см, рисунок 2.60.

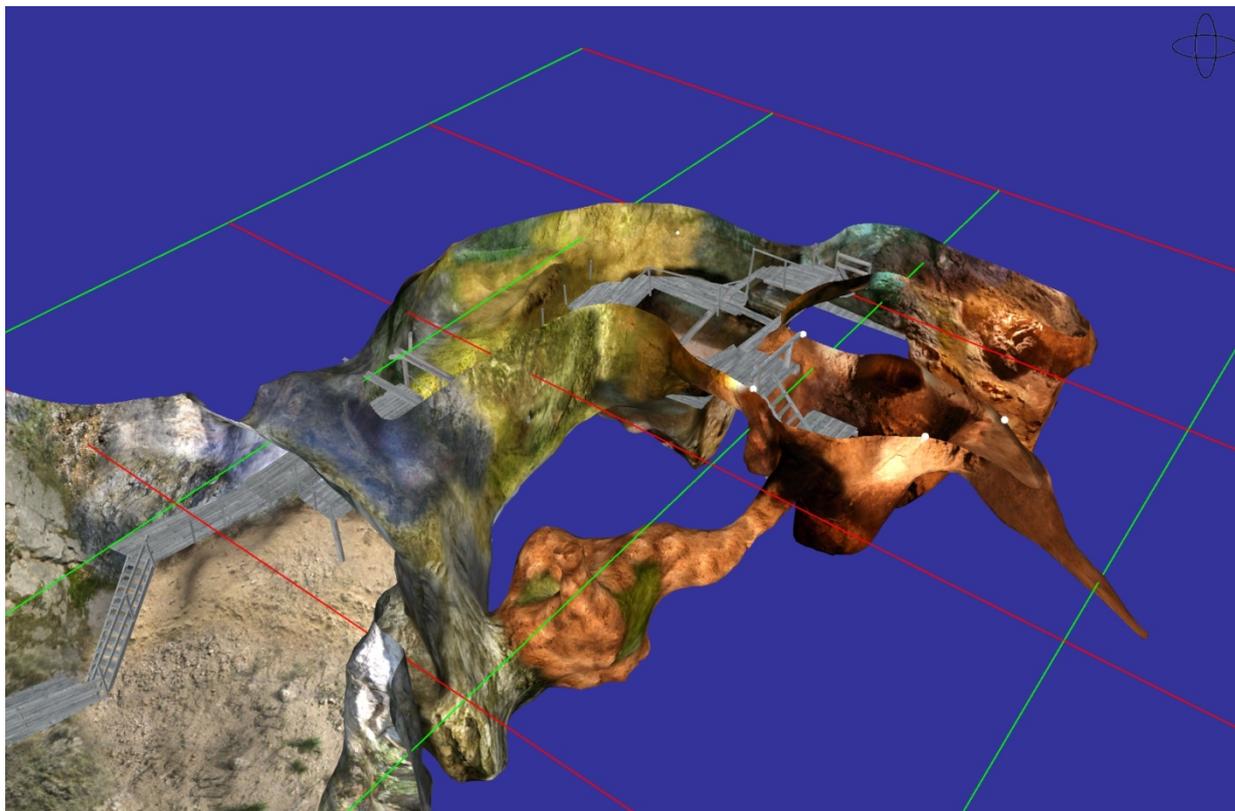


Рисунок 2.60 — Срез 3D-модели на уровне +1 м с наложением координатной сетки (шаг сетки – 10 м). Точками показано положение реперов на стенах пещеры (4 репера на уровне +1 м и один репер на уровне 0 м)

Таким образом, была обеспечена возможность сопоставления созданной 3D-модели с археологическими схемами и непосредственного переноса массива имеющихся археологических данных в виртуальное пространство созданной 3D-модели, рисунки 2.61-2.63.

В первичных археологических данных для многих находок указана их ориентация в пространстве. В виртуальной 3D-модели поддержана автоматическая визуализация ориентации находок. Местоположение неориентированных находок отображается сферами, а местоположение ориентированных находок – эллипсоидами вращения, длинная ось которых ориентирована согласно археологическим данным, рисунок 2.63.

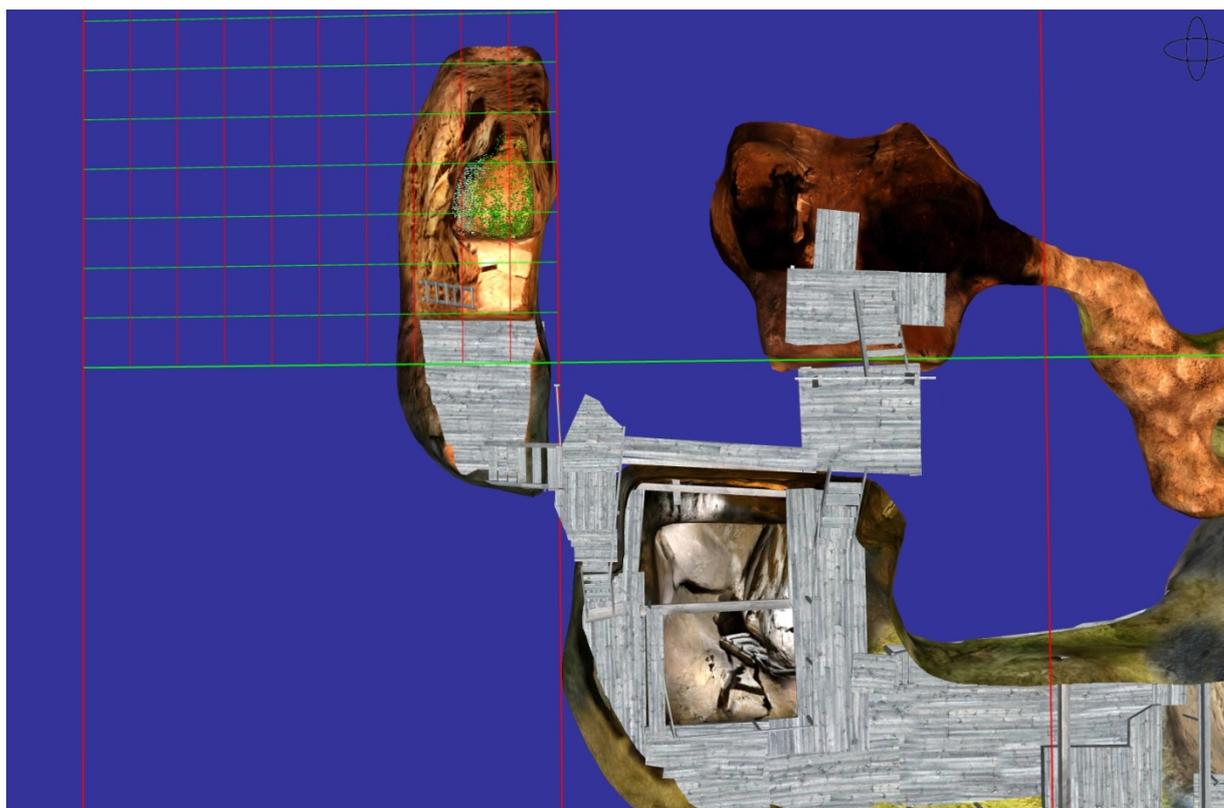


Рисунок 2.61 — Срез 3D-модели на уровне +1 м с наложением координатной сетки (шаг крупной сетки – 10 м)

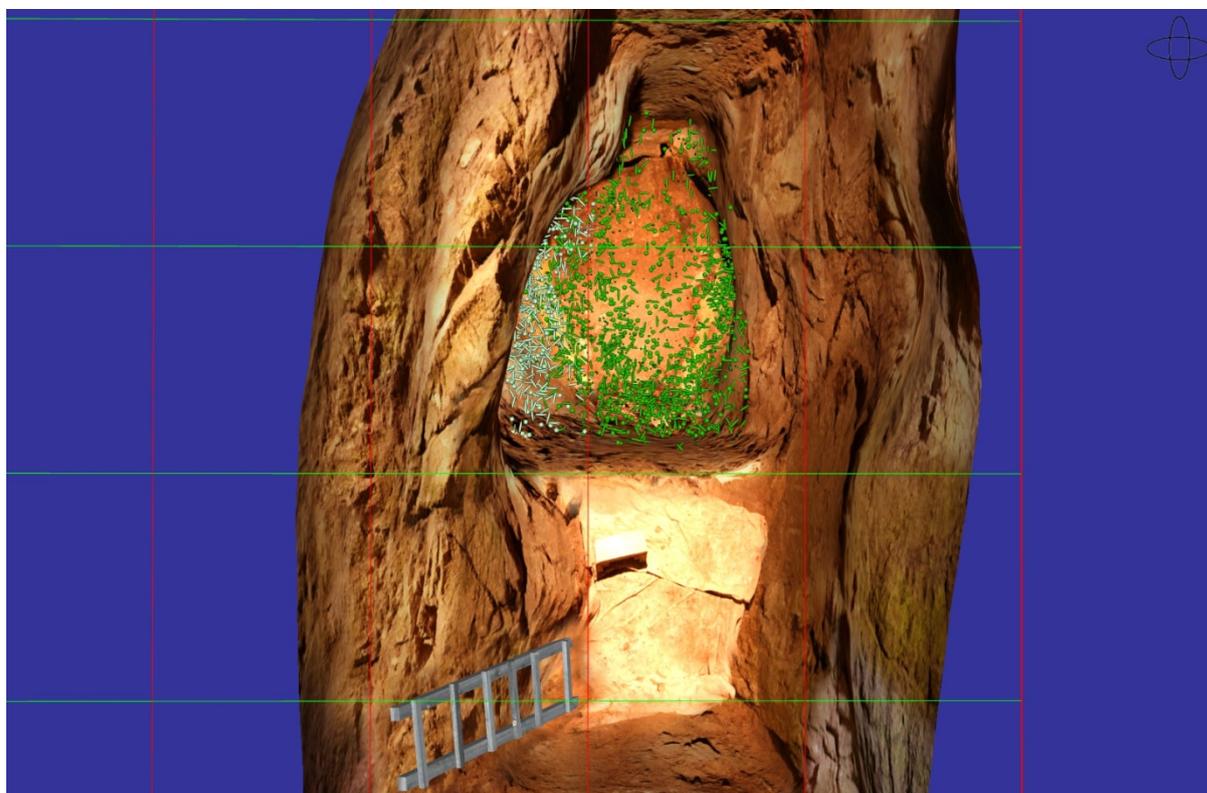


Рисунок 2.62 — Срез 3D-модели на уровне +1 м с наложением координатной сетки, крупный план восточной галереи (шаг сетки – 1 м)



Рисунок 2.63 — Визуализация расположения находок
в виртуальном пространстве 3D-модели

Отдельно были проведены лазерное сканирование, фотосъемка и 3D-моделирование нескольких образцов каменных орудий, рисунки 2.64 и 2.65, маркирующих различные культурно-хронологические этапы заселения пещеры. Созданные модели предметов содержат порядка 50 тыс. полигонов. При их текстурировании использованы карты смещений, полученные по более высокополигональным моделям (500 тыс. полигонов на предмет). Таким образом, была достигнута высокая визуальная реалистичность и детальность виртуальных предметов при относительно небольшом объеме модели и текстуры, что особенно важно для задач интерактивной визуализации в стереорежиме.

Для визуализации созданной 3D-модели пещеры была разработана интерактивная 3D-презентация (программное обеспечение) [Леонов, Бобков, 2013], которая будет подробно рассмотрена в следующей главе.



Рисунок 2.64 — Текстурированная полигональная 3D-модель каменного артефакта (скребло, слой 12)



Рисунок 2.65 — Текстурированная полигональная 3D-модель каменного артефакта (леваллуазское острие, слой 11)

Сравнение с аналогичными проектами. По-видимому, впервые лазерный сканер был применен для создания трехмерной модели пещерной палеолитической стоянки в пещере Коске (Cosquer) в 1994 г. [Thibault, 2001], [Billaud et al., 2014]. Пещера находится на средиземноморском побережье Франции недалеко от Марселя, ее большая часть затоплена. Вход в пещеру находится на глубине 37 м под водой, для попадания в сухую часть пещеры нужно преодолеть 170-метровый подводный туннель. Вход в пещеру был обнаружен Анри Коске в 1985 г., но лишь к 1991 г. он сумел преодолеть подводный туннель и достичь сухой части пещеры. Пещера содержит наскальные росписи эпохи палеолита.

Проект создания виртуальной копии пещеры Коске был инициирован администрацией Марселя и поддержан Министерством культуры Франции. Трехмерная сканирующая лазерная система была предоставлена компанией Électricité de France (EdF) в рамках корпоративной программы спонсорской поддержки культурных проектов, рисунок 2.66. Система состояла из сенсора SOISIC и программного обеспечения 3dipsos, разработанных компаниями MENSI и EDF. Сенсор позволял получать до 100 точек в секунду на расстояниях до 40 м с разрешением 1 мм на дистанции 5 м (для поверхностей в пещере), а также содержал цветную видеокамеру, с помощью которой можно было делать фотоснимки.

Сенсор был доставлен в пещеру аквалангистом, процесс сканирования контролировался техническим специалистом с компьютера, установленного на берегу, через 300-метровый кабель. Было сделано 28 сканов, получено 4,7 млн точек, а также 128 цветных фотографий. Работа заняла 67 часов. Среднее расстояние между точками составило 2,5 см. С помощью программного обеспечения по облаку точек лазерного сканирования была сгенерирована полигональная модель поверхности, которая затем была текстурирована с использованием полученных цветных фотографий. На основе виртуальной 3D-модели сгенерированы фильмы и стереофильмы, которые можно увидеть в Историческом музее Марселя.

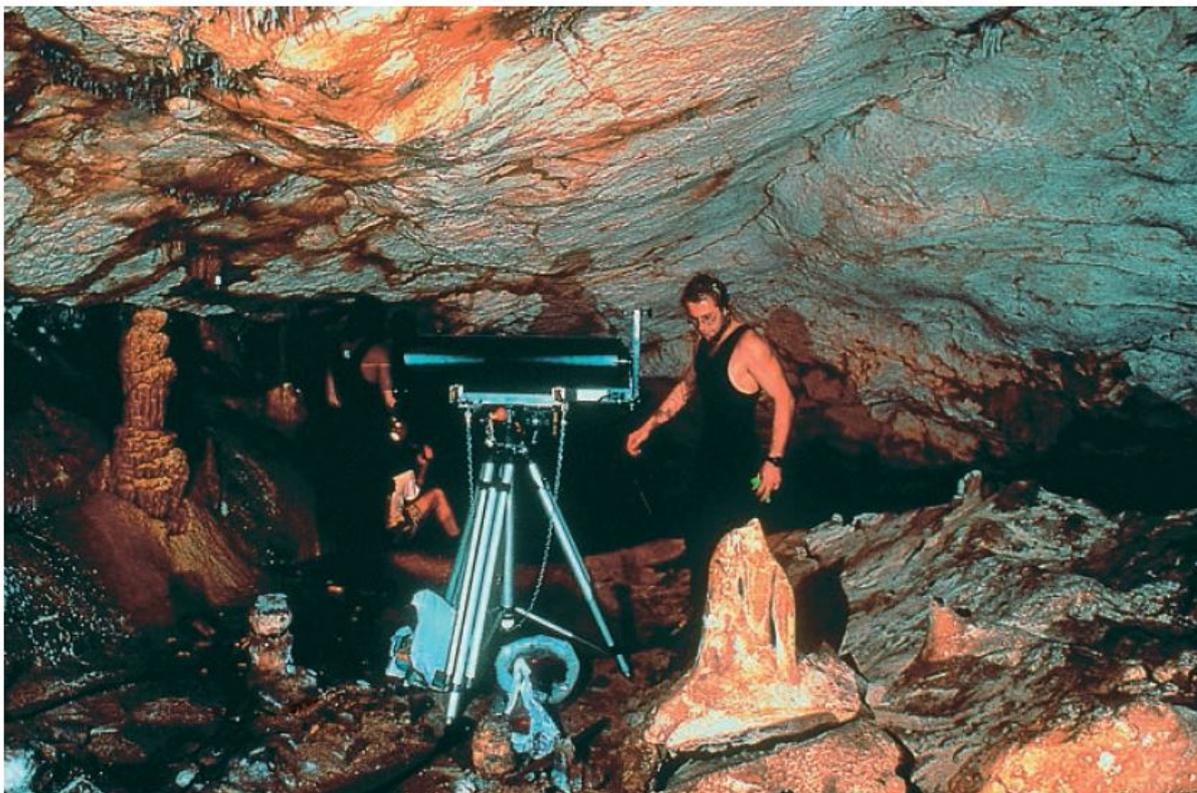


Рисунок 2.66 — Лазерное сканирование пещеры Коске с использованием сканера SOISIC, 1994 год (Ministère de la Culture / EdF, Франция) [Billaud et al., 2014].

В 1998 г. лазерный сканер был применен для 3D-моделирования всемирно известной пещеры Альтамира в Испании. Альтамира – это первая пещера, где были найдены наскальные рисунки эпохи палеолита в 1880 г., объект Всемирного наследия ЮНЕСКО с 1985 г. Лазерное сканирование стало частью масштабного 13-летнего проекта по созданию точной физической копии пещеры в масштабе 1:1 (1988-2001 гг.). В течение 8 месяцев специалисты компании Tragasanto (Мадрид) отсканировали 2600 кв. м. поверхности, получив около 6 млн. точек. Использовался лазерный сканер Minolta VI-700 3D Digitizer [Donelan, 2002]. Участки поверхности с рисунками были обмерены с разрешением 4 мм, участки без рисунков – с разрешением 40 см. Для некоторых участков, где требовалась высокая детализация, использовалось разрешение 0,9 мм [Digital Applications..., 2005, P. 111]. На основе цифровой 3D-модели была создана реалистичная физическая копия пещеры. Педро Саура (Pedro Saura) и Матильда Мискес

(Matilde Muzquiz), семейная пара художников, за три года воспроизвели в «Альтамире-2» 70 гравировок и около 100 фигур животных. В настоящее время туристы в основном посещают Альтамиру-2, посещение оригинальной пещеры ограничено на уровне 20 человек в день.

В 2004 г. в рамках проекта FOVEA (<http://foveaproject.free.fr/>) выполнено виртуальное 3D-моделирование пещеры Араго во Франции (Cave of Arago, Tautavel) по существующим стратиграфическим схемам. Сведения об археологических находках из существующей базы данных отображаются в виртуальном пространстве модели, рисунок 2.67. База данных "Paleontology and Prehistoric Material" (PostGreSQL) содержит информацию о 250 тыс. объектах, найденных в пещере Араго за более чем 30 лет исследований: координаты каждой находки и от 30 до 300 атрибутов (текстовых файлов).

Координаты объекта в виртуальной 3D-модели визуализируются маркером, по клику выводится подробная информация об объекте. Для некоторых объектов в рамках проекта созданы 3D-модели (в том числе с использованием лазерного сканирования), которые также отображаются в виртуальном пространстве модели. Разработка выполнена на основе графического интерфейса OpenGL [Thomas et al., 2004]. В 2007 г. выполнено лазерное сканирование пещеры Араго с использованием лазерного сканера Trimble-MENSI GS200. Сделано 14 сканов, построена 3D-модель в виде облака точек (20 млн. точек) и полигональная модель, по которой построены поперечные сечения с шагом 10 см в области раскопа и 1 м в остальной части пещеры. Набор сечений интегрирован в существующую базу данных по пещере Араго [Chandelier, Roche, 2009].

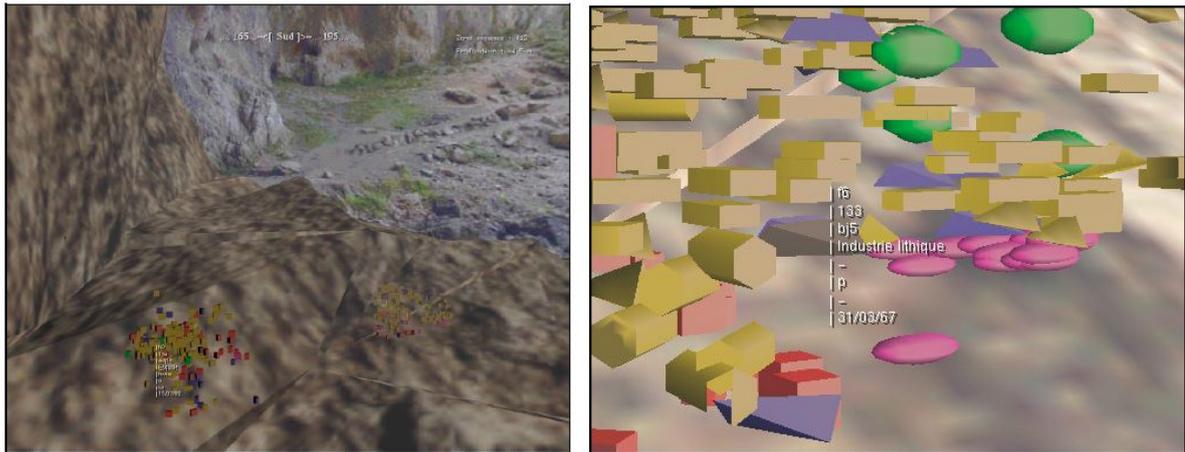


Рисунок 2.67 — Визуализация археологических находок в виртуальном пространстве цифровой 3D-модели [Thomas et al., 2004]

В 2003 г. начался проект по созданию виртуальной 3D-модели неолитической пещеры Grotta dei Cervi в Италии. Описание проекта есть на сайте CASPUR (Interuniversity Consortium for Supercomputing Applications for University and Research): <http://3dlab.caspur.it/index.php/progetti/24-grotta-dei-cervi-porto-badisco>. В 2005 г. было выполнено лазерное сканирование в четырех залах пещеры. Использовался лазерный сканер высокого разрешения, разработанный компанией Neptec Design Group (Канада) для НАСА для задач контроля обшивки шаттлов, и доработанный специально для данного проекта. Сканер позволял сканировать небольшие участки (0,16-1 кв. м.) с высоким разрешением (0,2-2 мм). Выполнено 716 сканов с общим объемом первичных данных 630 млн. точек. Для получения текстур использовались цифровые фотокамеры Kodak-14N и Canon 20D, сделано 3500 фотоснимков. На основе полученной мозаики 2D и 3D изображений в 2006-2007 гг. были собраны виртуальные текстурированные 3D-модели отсканированных участков [Beraldin et al., 2006]. В 2008 году выполнена виртуальная реконструкция одного из залов и стерео визуализация созданной модели с использованием технологии виртуальной реальности. В 2009 году работы по сканированию и фотосъемке были продолжены с использованием лазерного сканера Surphaser 25HSX. Был полностью отсканирован главный коридор пещеры длиной 250 м, сделано 82 скана с общим объемом

первичных данных 26,4 млрд. точек, а также 2500 фотографий. Для обработки данных и визуализации результатов использовалось программное обеспечение Atelier3D и Polyworks. Создана 3D-модель большей части главного коридора в виде облака точек. Глобальное выравнивание сканов выполнено с точностью 15 мм, итоговая модель разрезана на 34 куса для удобства визуализации. Предполагается создание текстурированной полигональной 3D-модели и использование ее для различных научных задач и виртуальных экскурсий [Beraldin et al., 2011].

В 2007 г. выполнено лазерное сканирование, фотограмметрическая съемка и 3D-моделирование палеолитической пещеры Parpalló в Испании. Использовался сканер FARO LS 880NE с разрешением 3 мм на дистанции 10 м. Сделано 14 сканов, получено облако точек объемом 123 млн. точек. Также выполнена фотосъемка с использованием камеры Canon EOS D60. По данным сканирования и фотосъемки построена текстурированная 3D-модель объемом 7,5 млн. полигонов, точность модели авторы оценивают в 1 см. Таким образом, создана детальная, визуально реалистичная и метрически точная виртуальная модель пещеры, которая может использоваться для различных целей [Lerma, 2009].

В 2008 г. выполнено лазерное сканирование и цифровое 3D-моделирование пещер Las Caldas и Peña de Candamo в Испании. Пещеры Las Caldas и Peña de Candamo входят в список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО под названием «Cave of Altamira and Paleolithic Cave Art of Northern Spain» (<http://whc.unesco.org/en/list/310>). Пещера Альтамира была внесена в список в 1985 г, еще 17 пещер (включая Las Caldas и Peña de Candamo) добавлены в 2008 г.

В задачи работ входило как виртуальное моделирование общей геометрии пещеры, так и цифровая фиксация локального рельефа палеолитических наскальных рисунков и гравировок. Использовались лазерный сканер Trimble GS200, цифровая фотокамера Sony DSC F828 и тахеометр Leica TPS 800, полученные данные сводились в единую систему

координат. Сканирование пещеры в целом выполнялось с разрешением 20 мм на дистанции 10 м, сканирование палеолитических гравировок и рисунков – с разрешением 2 мм на дистанции 10 м. Полевой этап работ занял 8 часов. Обработку данных вели 6 человек в течение 3 месяцев. В результате работ для каждой пещеры создана общая текстурированная 3D-модель с пространственным разрешением 1-2 см, и текстурированные 3D-модели участков поверхности с рисунками и гравировками с пространственным разрешением 2-3 мм, зарегистрированные в единой системе координат. На основе 3D-моделей созданы наборы горизонтальных и вертикальных 2D-сечений пещер [González-Aguilera et al., 2009].

В 2008 г. выполнено лазерное сканирование и 3D-моделирование пещеры Wonderwerk в Южной Африке. Пещера имеет длину 140 м, ширину 11-24 м и высоту 2-10 м. Использовался сканер Leica HDS 3000 и программное обеспечение Cyclone, полевой этап работ занял три дня. Сделано 16 сканов, расстояние между точками составило не менее 3 см по горизонтали и 2 см по вертикали. Для точной сшивки сканов использовались реперы (светоотражающие мишени), координаты которых были сняты теодолитом. По облаку точек построена полигональная 3D модель с использованием программного обеспечения Geomagic. Также была выполнена теодолитная топоъемка холма, в котором расположена пещера (высотой 122 м), с шагом 5 м по горизонтали. Модели пещеры и холма были совмещены в единой системе координат. Планируется создание сайта, где в свободном доступе будет представлена виртуальная модель пещеры и связанная с ней информация об археологических находках [Rüther, 2009].

В 2013-2015 гг., после нескольких лет подготовки, был выполнен масштабный проект по физическому 3D-моделированию пещеры Шове (Chauvet Cave) во Франции [Delannoy et al., 2014]. Судьба этой пещеры необычна: практически сразу после ее открытия Жан-Мари Шове в 1994 году, было принято решение о ее консервации и создании физической трехмерной копии для широкой публики неподалеку от оригинальной

пещеры. Такое решение было продиктовано печальным опытом двух, пожалуй, наиболее известных пещер с палеолитическими рисунками: Альтамиры в Испании и Ласке во Франции. Из-за огромного количества посетителей в них увеличилась концентрации углекислого газа, что привело к появлению плесени, угрожающей рисункам; из-за этого их пришлось закрыть для широкой публики в 1977 и 1963 гг. соответственно.

Создать трехмерную копию пещеру Шове в полном объеме было невозможно в связи с ее большим размером (8400 кв. м.), поэтому было принято решение реконструировать лишь основные элементы и объединить их в уменьшенную копию пещеры площадью 3000 кв. м. Для создания отдельных элементов пещеры и их «сшивки» друг с другом широко применялись методы 3D-моделирования, рисунок 2.68. В частности, потребовалось более 680 часов лазерного сканирования [Walter, 2014].

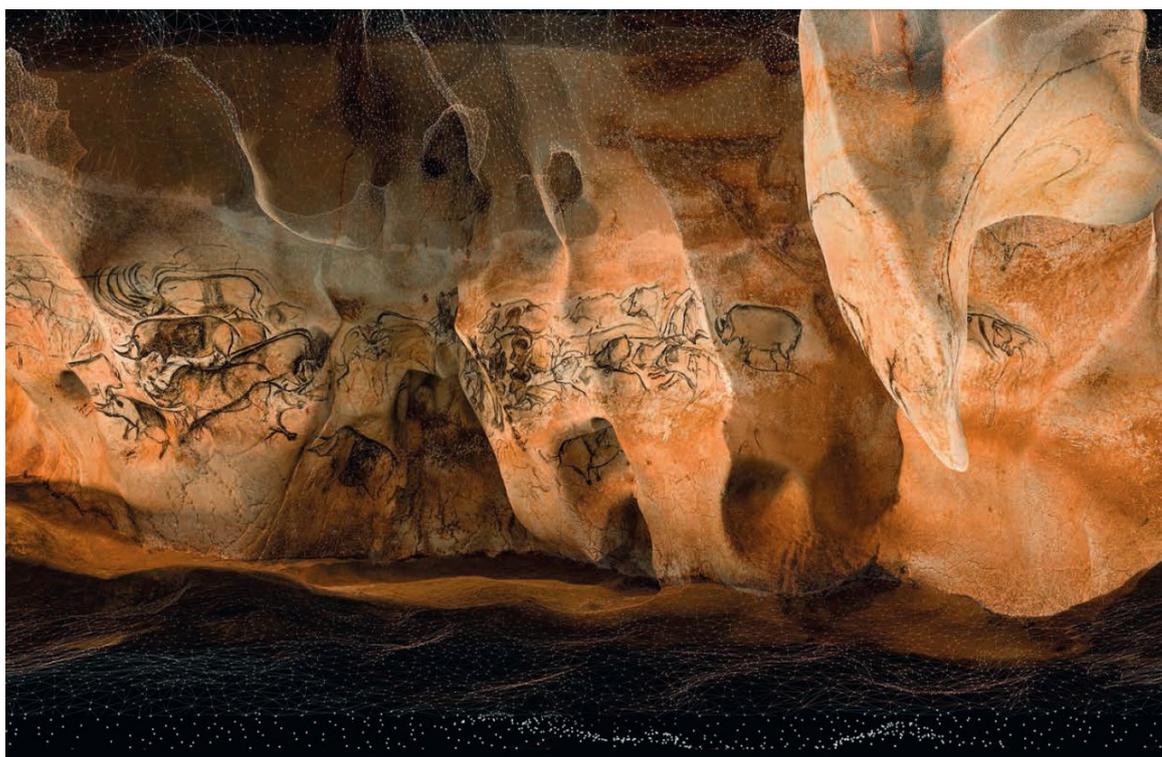


Рисунок 2.68 — Текстурированная 3D-модель северной стены «задней комнаты» пещеры Шове (Ардеш, Франция). Фотографии наложены на полигональную модель, созданную по облаку точек. Cliché P. Psaila, Perazio Engineering // CARSTOLOGIA 63, 2014.

На основе созданных 3D-моделей была построена и расписана физическая копия пещеры, рисунок 2.69.



Рисунок 2.69 — Создание физической трехмерной копии пещеры Шове (Ардеш, Франция). Роспись стен [Delannoy et al., 2014].

В результате, в 2015 году уменьшенная физическая копия пещеры Шове была открыта широкой публике. Виртуальный тур по оригинальной пещере (набор сферических панорам) свободно доступен в Интернете по адресу: <http://archeologie.culture.fr/chauvet/en/explore-cave>.

На сегодняшний день, реплика пещеры Шове является, по-видимому, крупнейшей физической копией палеолитической пещерной стоянки в мире, и одним из наиболее впечатляющих примеров применения современных цифровых 3D-технологий для сохранения культурного наследия.

Помимо моделирования палеолитических стоянок, лазерное сканирование и 3D-моделирование применялось для моделирования пещер Бронзового века, например, в пещере Les Fraux, Франция [Grussenmeyer et al., 2010]. Использовался лазерный сканер FARO Photon 80, фотоаппарат CANON EOS 5D, тахеометр Trimble VX. Итоговая 3D-модель пещеры выполнена без текстур и представлена в формате 3D-PDF для облегчения ее

использования археологами. Также созданы текстурированные 3D-модели наиболее интересных участков.

Обширная литература посвящена вопросам точного цифрового документирования и 3D-моделирования наскальных рисунков с использованием лазерного сканирования и фотограмметрии, начиная с [El-Nakim et al., 2004] и [Fryer et al., 2005] вплоть до [Domingo et al., 2013]. Обширная литература посвящена также вопросам 3D-моделирования каменных орудий по результатам лазерного сканирования и фотограмметрии. Анализ этих публикаций выходит за рамки нашего исследования.

Сведений о проектах по лазерному сканированию и 3D-моделированию палеолитических стоянок в пещерах на территории России и сопредельных стран, выполненных до 2013 г., обнаружить не удалось. Отметим проекты в смежных областях, близкие по технологии работ.

Вероятно, первым опытом применения лазерного сканирования для исследования пещер на территории бывшего СССР стали проекты 2007-2008 гг. в Киево-Печерской лавре. В июле 2007 г. специалистами НПП "Навигационно-геодезический центр" (г. Харьков) было выполнено лазерное сканирование Дальних и Варяжских пещер Киево-Печерской лавры. Использовался сканер Leica ScanStation. Выполнено свыше 160 сканов, создана 3D-модель коридоров общей протяженностью около 450 м в виде облака точек. На основе созданной модели созданы профили, сечения и план масштаба 1:500 [Горб, 2009]. В конце 2007 г. специалистами ООО «КМС» (Киев) выполнено сканирование Ближних пещер Киево-Печерской лавры. Использовался сканер Trimble Callidus. Выполнен 171 скан, создана трехмерная модель ходов общей длиной 422 м [Сканирование..., 2007]. В конце 2008 г. специалистами НПФ «Дока» (г. Львов) выполнено лазерное сканирование Аннозачатиевского храма в Дальних пещерах Киево-Печерской лавры. Использовался сканер Leica ScanStation2 [Ковтун, Серебряный, 2009].

В 2010 г. специалистами 3D Technologies R&D (г. Таллин, Эстония) было выполнено сканирование системы пещер Пиуза на юго-востоке Эстонии. Использовался сканер Leica HDS3000. По результатам сканирования и фотосъемки создана реалистичная 3D-модель пещер. На основе модели создано интерактивное демонстрационное приложение и виртуальный тур: с помощью 32-дюймовой сенсорной панели посетители могут «перемещаться» по виртуальной модели в режиме реального времени [Пилдре, 2011].

Обзор выполненных в мире проектов показывает, что история 3D-моделирования палеолитических пещерных стоянок насчитывает более 20 лет. Основная мотивация большинства работ – сохранение трехмерной информации о наскальных рисунках и гравировках, которые во многих случаях выполнены с использованием особенностей существующего рельефа (выпуклостей, трещин и др.) и являются, таким образом, не двумерными, а трехмерными изображениями. Уровень выполненных проектов (объем и детализация данных), в целом, пропорционален уровню развития промышленных лазерных сканеров и серийного программного обеспечения. Меньшее внимание уделяется задаче визуализации археологических находок в виртуальном пространстве, хотя возможность использования виртуальной модели для анализа данных подчеркивается практически всеми исследователями. Наименее развиты средства представления созданных цифровых 3D-моделей широкой публике. Стереовизуализация по технологии виртуальной реальности или создание интернет-сайта с доступом к виртуальной модели, в основном, лишь анонсируются (за исключением [Thomas et al., 2004]).

В конце 2013 г. Смитсоновский институт объявил о первых результатах масштабного проекта Smithsonian X 3D, посвященного оцифровке музейных экспонатов и других важных объектов и обеспечению свободного Интернет-доступа к виртуальным моделям [Cheves, 2014]. Трехмерные модели создаются специалистами Смитсоновского института по результатам

лазерного сканирования, фотограмметрии и томографии. Среди первых 20 моделей, выложенных в свободном доступе, есть 3D-модель пещеры Лианг Буа (Liang Bua) на о. Флорес в Индонезии, созданная по результатам лазерного сканирования. В 2003 г. в Лианг Буа было сделано важное археологическое открытие: новая эволюционная ветвь в развитии человека (*Homo Floresiensis*) [Morwood, 2004], что вероятно и послужило причиной включения этого объекта в проект Smithsonian X 3D. Модель пещеры достаточно простая и не имеет текстур. Однако это, вероятно, первая 3D-модель палеолитической пещерной стоянки, которая имеет удобный веб-доступ.

В России и на территории бывшего СССР первым проектом по лазерному сканированию и 3D-моделированию палеолитической пещерной стоянки стал, по-видимому, наш проект по моделированию Денисовой пещеры на Алтае [Anikushkin et al., 2013], [Леонов и др., 2014]. Созданная 3D-модель и программное обеспечение применяются как в демонстрационных, так и в исследовательских целях (например, для визуального анализа стратиграфии и осадконакопления), хотя, к сожалению, и без возможности свободного веб-доступа – как и подавляющее большинство аналогичных проектов.

2.4 Выводы по главе 2

Исследована специфика применения 3D-технологий в задачах истории науки и техники, и развиты новые методы и подходы к 3D-моделированию и визуализации крупномасштабных технических и природных объектов. Доказано, что цифровое 3D-моделирование является новым эффективным методом исследования объектов истории науки и техники (технических и природных объектов, процессов и комплексов). Доказано, что новые методы и технологии работы с трехмерной информацией позволяют на новом уровне подойти к исследованию известных объектов и получить новые историко-научные и историко-технические результаты.

На ряде примеров показано, что цифровое трехмерное моделирование позволяет успешно:

- реконструировать утерянные элементы (части) объекта и исторический облик объекта в целом;

- исследовать взаимосвязи элементов исследуемого объекта между собой и с внешней средой в их историческом развитии;

- исследовать структуру (конструкцию) и историю развития (жизненный цикл) технических и природных объектов;

- анализировать точность исторической документации и различия между документацией разных лет;

- изучать историю развития представлений об объекте; выдвигать и проверять гипотезы об истории развития и изучения объекта;

- систематизировать известную информацию и ставить вопросы для новых исследований.

Изучение конструкции Шуховской башни на Шаболовке с использованием виртуального 3D-моделирования позволило выявить расхождения фактической конструкции с исторической документацией. Благодаря цифровому 3D-моделированию впервые установлена истинная высота оригинальной несущей конструкции Шуховской башни на Шаболовке – 145 м, которая более чем на метр отличается от значения, приведенного в сохранившейся обмерной документации. Впервые детально проанализированы расхождения проектной и обмерной документации с реальной конструкцией башни, выявлено упрощение технологии монтажа промежуточных колец непосредственно в ходе возведения башни.

Виртуальное 3D-моделирование Долины гейзеров на Камчатке позволило на новом уровне выполнить исследование исторической литературы и неопубликованных источников, выполнить систематизацию гейзеров и кипящих источников и создать их современный каталог. Благодаря виртуальному 3D-моделированию впервые был проведен подробный анализ истории развития картографии и топономики уникального

природного объекта со сложным и меняющимся во времени рельефом, определены точные географические координаты более чем 150 гейзеров и кипящих источников — как существующих, так и утерянных. В результате этой работы был создан и опубликован современный каталог гейзеров и кипящих источников Кроноцкого заповедника.

Виртуальное 3D-моделирование электромобиля «Колумбия» из коллекции Политехнического музея и виртуальная реконструкция утраченных элементов позволили выявить ошибки, допущенные при его реставрации, смоделировать расположение утраченных элементов и лучше подготовиться к физической реставрации объекта.

Лазерное сканирование крейсера «Аврора», скульптуры «Родина-Мать зовет!» позволило сохранить точную трехмерную информацию о геометрии этих объектов, которая может оказаться полезной в будущем для различных научно-исследовательских и прикладных задач: оценки изменений геометрии (деформаций, деградации) объектов во времени, планировании реставраций и реконструкций, задач популяризации.

Виртуальное 3D-моделирование Денисовой пещеры на Алтае позволило с недоступным ранее уровнем точности проанализировать историческую документацию об археологических раскопках, выявить расхождение исторической документации (используемых археологами схем пещеры) с истинной геометрией пещеры. Впервые в России была создана трехмерная цифровая модель палеолитической пещерной стоянки, создан программный инструментарий для трехмерного анализа расположения археологических находок, анализа стратиграфии и осадконакопления.

Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ

3.1 Создание 3D-презентаций для представления объектов истории науки и техники

Чтобы пользователь мог самостоятельно осматривать и изучать 3D-модель объекта, включая его внешний вид и внутреннее устройство, «путешествовать» по виртуальной модели, виртуальная 3D-модель должна быть снабжена соответствующим программным инструментарием. Такое программное приложение (3D-презентация) может использоваться не только для демонстрации образа объекта широкой публике, но и для анализа объекта специалистами, а также для образовательных приложений. Средства и сценарии взаимодействия пользователя с 3D-моделью могут включать, в том числе, и игровые компоненты (например, игровую форму процесса ознакомления с объектом), что позволяет существенно повысить заинтересованность пользователей, особенно среди молодежной и детской аудитории. Это актуально, например, в рамках музейной экспозиции.

Создание виртуальной 3D-модели и разработка программного обеспечения для ее представления пользователю – две практически независимые задачи. Задача создания виртуальных 3D-моделей объектов истории науки и техники была рассмотрена в предыдущей главе; в данной главе мы рассмотрим актуальный вопрос представления виртуальных 3D-моделей и связанной с ними информации специалистам и широкой публике.

В задаче представления виртуальных 3D-моделей и связанной с ними информации можно выделить два основных вопроса: методический и технический.

С методической точки зрения, необходимо отметить следующее. В настоящее время активно развиваются концепции и технологии, связанные с синтетическим (интегрированным, комплексным) представлением информации. Их цель – удобное представление больших массивов

разнородных данных в форме (или на основе) визуально осмысленных 3D-моделей, благодаря чему достигается гармоничная активизация левополушарного (логического) и правополушарного (ассоциативного) мышления и лучшее понимание (восприятие) информации. С ними тесно связаны также технологии совмещения развлечения и образования (эдьютейнмент, «edutainment» = «education» + «entertainment»), реализующие давно известный принцип «лучший способ обучения – игра». Современным технологическим воплощением этого принципа являются «серьезные игры» (serious games) [Okan, 2003], [Charsky, 2010], когда инструментарий компьютерных игр применяется для задач обучения или тренировки.

Данная тенденция выразилась в развитии целого ряда подходов и технологий, к которым относятся, прежде всего:

1. Системы «виртуального окружения» (virtual environment), или «виртуальной реальности» (virtual reality), обеспечивающие представление сложных массивов абстрактных данных в форме визуально осмысленных моделей и «погружение» исследователя в 3D-модель изучаемого процесса или явления. Одной из основных областей применений таких систем изначально были (и до сих пор являются) задачи научной визуализации [Rosenblum et al., 1994], [Virtual..., 2014a], [Virtual..., 2014b].

2. Технологии «интерактивного повествования» (interactive storytelling) в виртуальном окружении, которые дают пользователю возможность максимально естественным, не опосредованным образом регулировать поток информации, поступающей к нему в процессе взаимодействия с информационной системой (прежде всего для индивидуальной коррекции баланса между развлечением и образованием) [Cavazza et al., 2002], [Байгозин и др., 2004], [Danilicheva et al., 2009], [Crawford, 2012].

3. Системы поддержки принятия решений, СППР (decision support system, DSS), основанные на принципе «владения обстановкой», или «ситуационной осведомленности» (situational awareness) [Endsley, 1995], [Stanton et al., 2001]. Их суть в том, чтобы предоставить пользователю весь

объем разнородной информации, имеет отношение к рассматриваемой ситуации или задаче, в максимально удобном и естественном виде, обеспечить ее глубокое и комплексное понимание для прогнозирования обстановки и принятия решений. Современные СППР, воплощающие принцип «ситуационной осведомленности», во многом базируются как на технологиях 3D-визуализации, так и на новых технологиях представления геоинформации (неогеографии) [Еремченко, 2009].

4. Концепция неогеографии [Turner, 2006]. С начала 2000 гг. идет стремительное распространение общедоступных данных дистанционного зондирования земли (ДДЗ) высокого разрешения. На основе этих данных быстро развивается открытая геопространственная основа, которая обеспечивает принципиально новый уровень интеграции, структурирования и визуального представления геоинформации (то есть любых данных, имеющих в качестве одного из параметров географическую привязку). Идет процесс формирования мирового геоинформационного пространства: объединение разнородной информации в рамках открытых информационных систем на базе открытой геопространственной основы, развитие средств удобного и визуально достоверного представления геоинформации, структурирование геоинформации согласно новым принципам ее представления. Весь этот комплекс процессов, методов, технологий получил название «неогеография» (neogeography) – то есть, дословно, «новая география» [Turner, 2006], [Еремченко, 2008]. Это методы визуального представления информации о земной поверхности и примыкающих к ней слоях грунта и атмосферы, освоенных человеком (непосредственно или на уровне моделей). Интересно отметить, что сфера применения неогеографии совпадает с пространственной локализацией ноосферы, согласно представлениям, предложенным академиком В.И. Вернадским. Поэтому основную задачу неогеографии можно образно сформулировать как «визуализация ноосферы».

Постоянное развитие указанных трендов выражается в следующем. Во-первых, получение визуальной информации в 3D-форме (в том числе в стерео-режиме с использованием 3D-экранов или индивидуальных 3D-устройств – очков, шлемов и т.п.) становится все более привычным для массового пользователя. Во-вторых, массовый пользователь, и прежде всего молодежь, привыкает получать любую геоинформацию на базе визуально достоверной геопространственной основы. Становится нормой высокая степень интеграции и взаимосвязи разных типов геоданных, а также их удобное и естественное визуальное представление. В-третьих, на уровне массового сознания (и подсознания) происходит постепенное смещение предпочтений к поступающему извне информационному потоку в область синтетического восприятия информации, по крайней мере, в сфере решения прикладных задач. Например, выбирая ресторан с помощью приложения в своем смартфоне, пользователь ожидает получить целый комплекс мультимедийной информации, включая текстовое описание, звуковое сопровождение, рекламные видеоролики, графические изображения, интерактивную 3D-модель для заказа столика, географическую карту для планирования маршрута поездки и т.д.

Технологическая основа для синтетического представления информации, основанного на интерактивных виртуальных 3D-моделях и геопространственных данных высокого разрешения, развивалась на протяжении 2000-х годов. Символический переход на новый уровень технологической оснащенности произошел в конце 2000-х гг., когда производительность графических процессоров (аналог правого, «ассоциативного» полушария человеческого мозга) сравнялась с производительностью центральных процессоров (аналог левого, «логического» полушария). Соответственно, на протяжении всех 2010-х гг. наблюдалось постепенное смещение массовых предпочтений в область синтетического представления и восприятия информации, что, безусловно, взаимосвязано с развитием вычислительной техники.

Таким образом, основной методической задачей при разработке программного обеспечения для представления виртуальных 3D-моделей объектов истории науки и техники является обеспечение удобного доступа к виртуальным 3D-моделям и связанным с ними данным на основе принципов синтетического представления информации. Соотношение информационной ценности виртуальной 3D-модели и базы данных может быть разным. Если основную информацию несет виртуальная 3D-модель, то можно рассматривать создаваемый комплекс как «3D-модель с дополнительным описанием». Если же основной объем информации содержится в базе данных, то можно рассматривать создаваемый комплекс как «базу данных с интерфейсом на основе 3D-модели». Так или иначе, в основе создаваемых систем лежит виртуальная 3D-модель объекта (или комплекс таких моделей), а в более широком смысле – информация, привязанная к некоторой трехмерной системе координат, связанной с объектом.

Информация, зафиксированная таким образом (т.е. в привязке к трехмерной системе координат), получила название 3D-документа. Концепция 3D-документа (но не его научное определение) и примеры их применения представлены в работах Дитера Феллнера (Dieter Fellner) [Fellner et al., 2007], Свена Хавеманна (Sven Havemann) [Havemann et al., 2009], Фабио Ремондино (Fabio Remondino) [Remondino, Rizzi, 2010].

Точное определение понятия 3D-документ будет дано в следующей главе, здесь лишь отметим, что под определение 3D-документа попадает любая виртуальная 3D-модель или комплекс виртуальных 3D-моделей, взаимоувязанные с традиционными формами документированной информации (текстами, изображениями, звукозаписями и т. д.). Эта документированная информация может быть сохранена в базах данных, файловых системах и т. п., в том числе с удаленным и/или распределенным доступом, в том числе через сеть Интернет, рисунок 3.1 [Leonov et al., 2011], [Леонов и др., 2012].

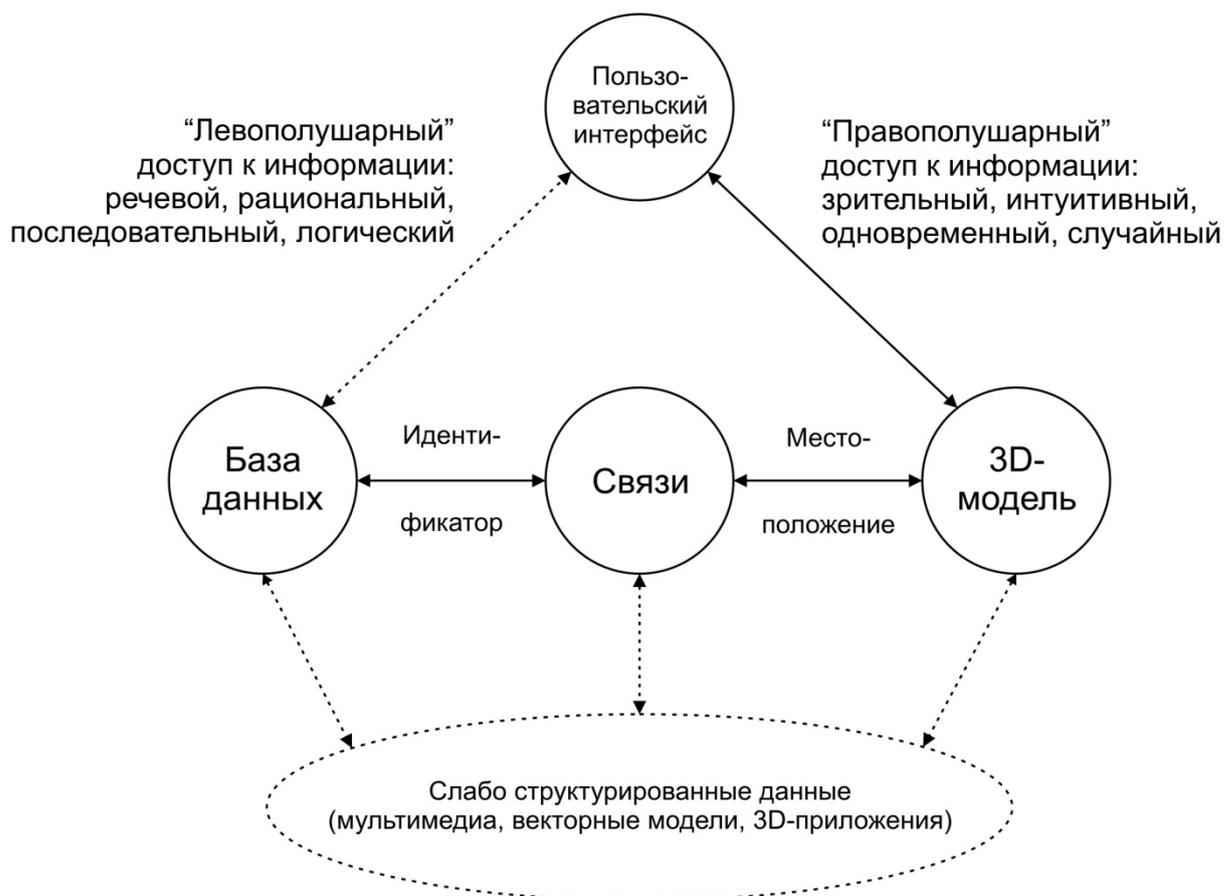


Рисунок 3.1 — Общая схема 3D-документа

В основе 3D-документа лежит визуальный образ, 3D-модель объекта или процесса. Соответственно, наиболее естественным для пользователя способом восприятия 3D-документа является его воспроизведение на системе виртуального окружения, когда пользователь может «погрузиться» в виртуальное трехмерное пространство модели и взаимодействовать с информационной системой «через» 3D-модель. Виртуальная 3D-модель выступает одновременно и как когнитивный объект (визуальный образ, который имеет собственную информационную ценность), и как 3D-интерфейс к информационной системе.

Для создания интерактивного 3D-приложения необходимо дополнить 3D-документ пользовательским интерфейсом, а также сюжетом (сценарием), задающим основные линии взаимодействия пользователя с виртуальным пространством 3D-документа. Таким образом, методы и технологии создания

3D-документов оказываются тесно взаимосвязанными с методами и технологиями виртуальной реальности и интерактивного повествования.

С технологической точки зрения, как отмечалось выше, для обеспечения доступа к виртуальным 3D-моделям (3D-документам) и их коллекциям (наборам) могут применяться два подхода: индивидуализированный или массовый [Леонов, 2014д].

Индивидуализированный подход предполагает использование стационарного или мобильного программно-аппаратного комплекса, как правило с большим экраном, зачастую с поддержкой специфических функций отображения (например, стерео) или взаимодействия (сенсорные экраны, манипуляторы). Такой комплекс может быть установлен, например, в музее в качестве элемента экспозиции. При этом может подразумеваться либо непосредственное взаимодействие пользователя (зрителя) с данным комплексом, либо наличие оператора, осуществляющего демонстрацию. Программное обеспечение в этом случае разрабатывается с учетом индивидуальных технических особенностей используемого оборудования и не может быть перенесено на другой аппаратный комплекс (или в Интернет) без значительной переработки. Примеры реализации таких систем можно найти во многих крупных современных музеях.

Массовый подход предполагает создание автономного программного продукта, который можно установить на пользовательском компьютере, либо создание веб-приложения, предназначенного для просмотра в браузере. В обоих случаях, предполагается самостоятельное взаимодействие пользователя с программным продуктом, без возможности обратиться к помощи оператора. Веб-приложение, в свою очередь, может быть реализовано либо в варианте, требующем установки плагина к браузеру (например, Unity3D), либо в варианте, работающем непосредственно в браузере (например, WebGL). Безусловно, наиболее массовый доступ к 3D-документу может быть обеспечен за счет создания веб-приложения, не требующего установки плагина.

Реализация второго (массового) подхода долгие годы сдерживалась из-за объективных трудностей. К ним относятся, прежде всего, сложность разработки программного обеспечения для работы с 3D-документами, рассчитанного на массового пользователя, и отсутствие единого стандарта представления 3D-моделей для веб-браузеров. По-видимому, первой масштабной реализацией второго подхода стал проект «Smithsonian X 3D» Смитсоновского института (США) (<https://3d.si.edu>), представленный широкой публике в конце 2013 г. Просмотр и взаимодействие с 3D-моделями, а также доступ к связанной с ними информации осуществляется с помощью специального плагина для веб-браузера на основе WebGL, разработанного компанией Autodesk.

При организации веб-доступа к 3D-документам возникает ограничение на их объем: для крупных виртуальных 3D-моделей время скачивания может оказаться слишком большим, что является некомфортным для интернет-пользователя. С другой стороны, веб-доступ позволяет обеспечить доступ к виртуальной 3D-модели намного более широкому кругу пользователей, чем автономное приложение. Это обуславливает большую привлекательность веб-приложений для задач виртуального музея и их несомненную перспективность (о чем свидетельствует и проект Smithsonian X 3D).

Оба подхода к представлению виртуальных 3D-моделей (3D-документов) широкой публике – индивидуализированный и массовый – могут успешно применяться для задач виртуальных музеев. Но при этом необходимо понимать, что разработка универсального программного кода, который можно было бы использовать для всех вариантов представления, очень сложна. Значительно проще на основе одной и той же виртуальной 3D-модели и связанного с ней массива информации разрабатывать разные (независимые) пользовательские приложения, предназначенные для разных способов представления.

В обоих случаях, необходима разработка программных средств, которые обеспечивают визуализацию виртуальных 3D-моделей,

интерактивное взаимодействие с ними и вывод дополнительной информации (текстов, изображений и др.). Как правило, требуется также адаптация 3D-моделей в зависимости от выбранного способа представления (упрощение, текстурирование, перегруппировка элементов и т.д.). В случае создания массового приложения необходима также тщательная отладка и тестирование, поскольку предполагается самостоятельное взаимодействие пользователя с программным продуктом.

Развитый программный инструментарий позволяет пользователю самостоятельно осматривать и изучать 3D-документ, исследовать внешний вид и внутреннее устройство объекта. При необходимости, может быть создана масштабная виртуальная сцена, которая погружает пользователя в пространство модели, позволяет «путешествовать» по ней. Такие приложения могут использоваться как для образовательных целей, так и для научных задач.

Центром виртуальной истории науки и техники ИИЕТ РАН в 2011-2013 гг. разрабатывались технические решения по представлению 3D-документов в рамках первого подхода, т.е. адаптированные под конкретные программно-аппаратные комплексы (стереоскопические проекционные системы со спектральным и поляризационным разделением каналов, 3D-телевизоры и 3D-мониторы разных типов). Разработки были выполнены на основе программного инструментария OpenSceneGraph. В 2014-2015 гг. были также созданы прототипы приложений для веб-доступа в рамках второго подхода, на основе графического инструментария Unity3D.

Рассмотрим практическое воплощения описанных выше подходов на примере интерактивных 3D-презентаций для систем виртуальной реальности (реализация индивидуализированного подхода) и на примере интерактивных веб-презентаций с поддержкой 3D-графики в браузере (реализация массового подхода). Основной акцент будет сделан на методических вопросах и обсуждении полученных результатов, технические детали реализации

программного кода могут быть найдены в [Свид. 2015619269, 2015619270, 2015619271, 2015660907, 2015661073, 2015661074].

3.1.1 Разработка интерактивных 3D-презентаций для систем виртуальной реальности на основе OpenSceneGraph

Программно-аппаратный комплекс системы виртуальной реальности представляет собой, в минимальной конфигурации, достаточно мощный для обработки виртуальных 3D-сцен компьютер, подключенный к демонстрационному экрану с поддержкой стерео-режима отображения. Демонстрационный экран может представлять собой проекционную систему или телевизор крупного формата (обычно ЖК-телевизор) с поддержкой стерео-режима. Изображение формируется на компьютере, который подключен к демонстрационному экрану.

Предполагается, что презентацией управляет экскурсовод; но интерфейс желательно делать достаточно простым для того, чтобы было возможным также самостоятельное управление. Для управления 3D-презентацией могут использоваться два варианта. Первый вариант – управление с помощью мышки; недостаток этого варианта состоит в том, что при этом на демонстрационном экране отображается курсор мышки. Вторым вариантом – управление с помощью дополнительного сенсорного экрана, который подключен к компьютеру в режиме дублирования основного демонстрационного экрана (т.е. на сенсорном экране отображается то же самое, что на основном экране; в этом случае курсор на основном экране не отображается). В любом из вариантов, необходимо предусмотреть рабочее место экскурсовода (стол с мышкой либо тумбу с сенсорным экраном или информационный киоск), которое должно обеспечивать удобное взаимодействие с экскурсионной группой.

Программное обеспечение, установленное на компьютер, как правило, представляет собой интерактивную 3D-презентацию с поддержкой стерео отображения. Презентация поддерживает несколько вариантов отображения

виртуальной 3D-модели и связанной с ней информации, которые экскурсовод может переключать и использовать в произвольном порядке согласно задачам экскурсии. Типичный набор вариантов отображения включает:

1. Обзорный вид: в основном окне на демонстрационном экране отображается общий вид виртуальной 3D-модели. Возможно взаимодействие с ней: поворот, ограниченное масштабирование, управление видимостью отдельных элементов, вывод краткой информации об отдельных элементах (например, в виде всплывающих подсказок). Из основного окна возможен переход к режиму интерактивной визуализации сценариев, к режиму показа фильма/презентации, к режиму просмотра дополнительной информации.

2. Интерактивная визуализация сценариев: в основном окне на демонстрационном экране реализуется тот или иной сценарий, связанный с 3D-моделью, в том числе реконструированный на основе исторических данных: например, анимация объекта или процесса. Дополнительная информация может при этом отображаться на дополнительной информационной панели, либо на всплывающем информационном окне. Экскурсовод может в любой момент приостановить или снова запустить выполнение сценария, либо прервать его.

3. Демонстрация короткометражного фильма или слайд-презентации в основном окне на демонстрационном экране. Эффективным способом усиления эффекта 3D-презентации является создание короткометражных (2-3 мин.) фильмов на основе исторической хроники, 3D-моделей, интервью со специалистами и т.п. В случае ограниченного финансирования, вместо фильма можно создать 2-3 минутные слайд-презентации (исторические фотографии, текст, музыкальное сопровождение).

4. Доступ к дополнительной (например, архивной) информации: отображение на демонстрационном экране подробной информации из базы данных, связанной с 3D-моделью (тексты, фото, графика).

Для представления 3D-моделей и связанной с ними информации на стереоскопических системах виртуальной реальности было разработано программное обеспечение на основе OpenSceneGraph.

В частности, в 2011-2013 гг. на основе данного программного обеспечения были разработаны 3D-презентации для визуализации 3D-моделей космического эксперимента "Плазменный кристалл" [Свид. 2015619269], для визуализации 3D-моделей орбит космических полетов на основе виртуального глобуса [Свид. 2015619270], для визуализации 3D-моделей Денисовой пещеры на Алтае [Свид. 2015619271], для визуализации 3D-моделей супергидрофобных покрытий [Свид. 2015660907], для визуализации 3D-моделей Шуховской башни на Шаболовке [Свид. 2015661073], для визуализации геофизических данных и 3D-моделей на основе полупрозрачного виртуального глобуса [Свид. 2015661074], для визуализации интерактивной 3D-модели Долины гейзеров на Камчатке [Алейников и др., 2011]. Примеры интерфейса разработанного программного обеспечения приведены на рисунках ниже.

Например, интерактивная презентация для демонстрации 3D-моделей Шуховской башни на Шаболовке позволяет просмотреть созданные 3D-модели башни и связанную с ними информацию в привязке к геопространственной основе (карте Open Street Map), включая точечную 3D-модель, полигональную 3D-модель, набор сечений, созданный в ходе моделирования, реперные точки, рисунки 3.2-3.3.

Пользователь может выбрать интересующий его исторический период, при этом отображаются только те элементы башни, которые соответствуют данному историческому периоду (таким образом, можно изучать историческую эволюцию конструкции башни). Одновременное отображение точечной модели, набора сечений и полигональной модели позволяет визуально оценить точность и детализацию моделирования, рисунок 3.3.

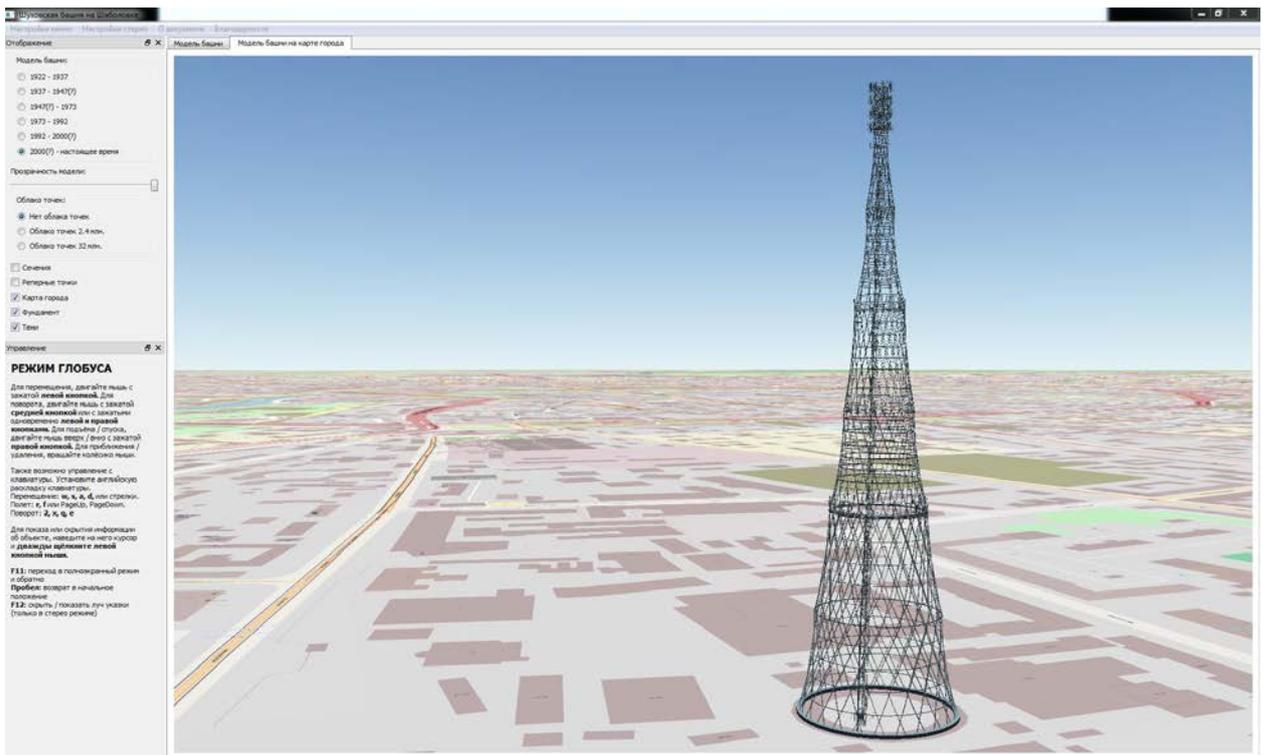


Рисунок 3.2 — Интерактивная визуализация 3D-моделей Шуховской башни на Шаболовке на основе OpenSceneGraph. Демонстрация полигональной 3D-модели в привязке к геопространственной основе (карта Open Street Map).

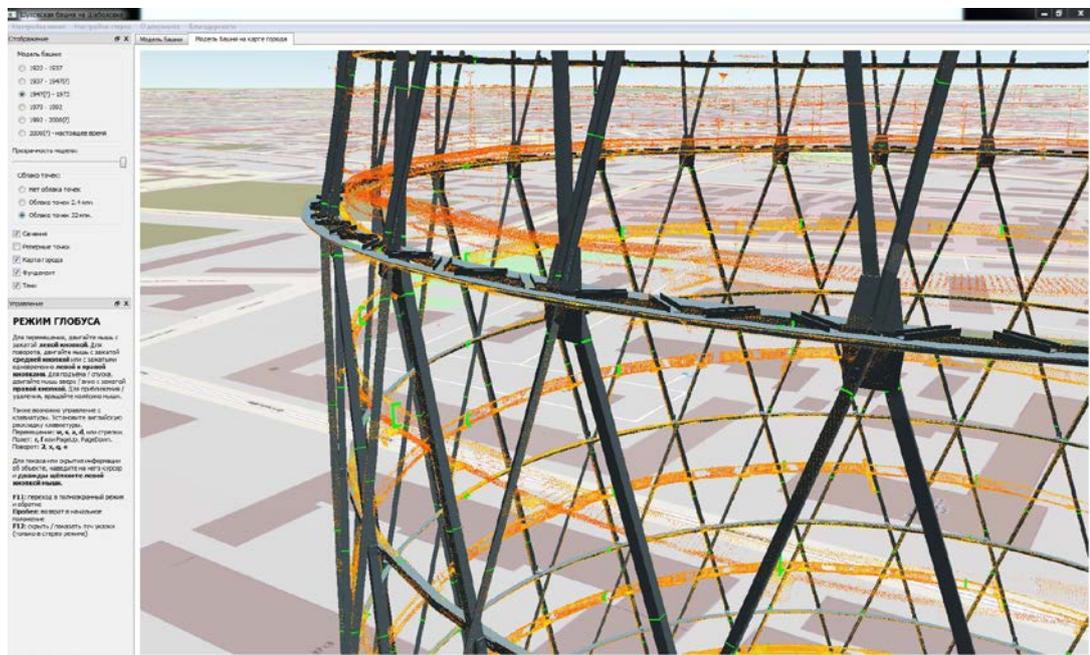


Рисунок 3.3 — Одновременная визуализация (совмещение в единой системе координат) нескольких наборов данных: точечной 3D-модели, набора сечений и полигональной 3D-модели Шуховской башни на Шаболовке, с привязкой к геопространственной основе (карта Open Street Map).

Интерактивная презентация для демонстрации 3D-модели Долины гейзеров на Камчатке позволяет просмотреть 3D-модель территории, внедренную на виртуальный глобус, изучить расположение основных достопримечательностей (гейзеров, кипящих источников и др.), а также туристической инфраструктуры (визит-центра, настильных троп и др.) и гидрографической сети бассейна реки Гейзерной (названия и местоположение ручьев). Местоположение основных объектов показано интерактивными маркерами (иконками), при нажатии на иконку открывается всплывающее окно с описанием соответствующего объекта, рисунки 3.4-3.5.

Описание объектов подгружается из базы данных, размещенной в сети Интернет; та же самая база данных используется для формирования динамических страниц веб-сайта. Для хранения координат иконок и гиперссылок на базу данных используется kml-файл, который может быть также отображен на общедоступном виртуальном глобусе Google Earth или на общедоступных картах Google Maps. Принципиальная схема реализации интерактивной 3D-презентации (3D-документа) с двумя вариантами представления показана на рисунке 3.6 [Леонов и др., 2012].

Таким образом, обеспечена возможность доступа к единой базе данных (каталогу объектов) разными способами: с использованием детальной 3D-модели на системе виртуальной реальности, с использованием упрощенной 3D-модели на основе общедоступного виртуального глобуса или общедоступных карт с поддержкой kml-формата, или с использованием традиционного текстового интерфейса веб-сайта. При доступе с помощью виртуальной 3D-модели, эта 3D-модель выступает в качестве интуитивного трехмерного интерфейса к базе данных. Отображение презентации в стерео режиме обеспечивает эффект «погружения» и позволяет проводить виртуальные экскурсии, что особенно актуально для этого труднодоступного объекта. Презентация используется для целей экопросвещения и виртуального туризма в музее ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник» в г. Елизово Камчатского края.

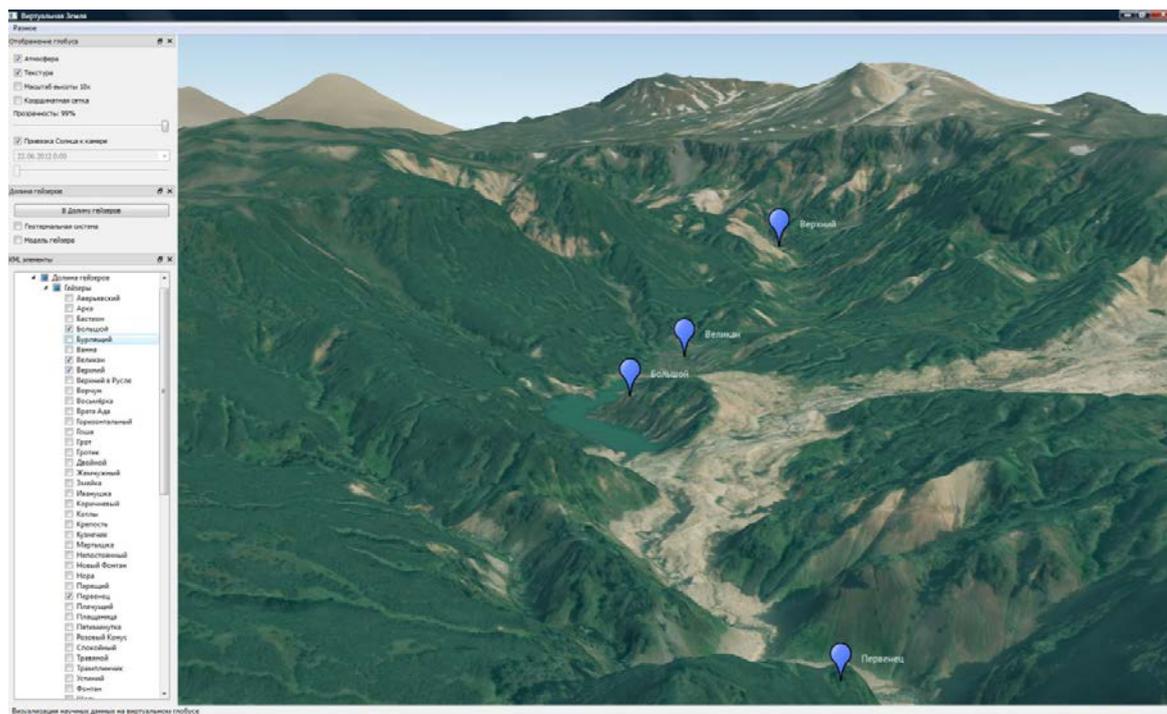


Рисунок 3.4 — Интерактивная визуализация 3D-модели рельефа в районе Долины гейзеров на Камчатке, общий вид.

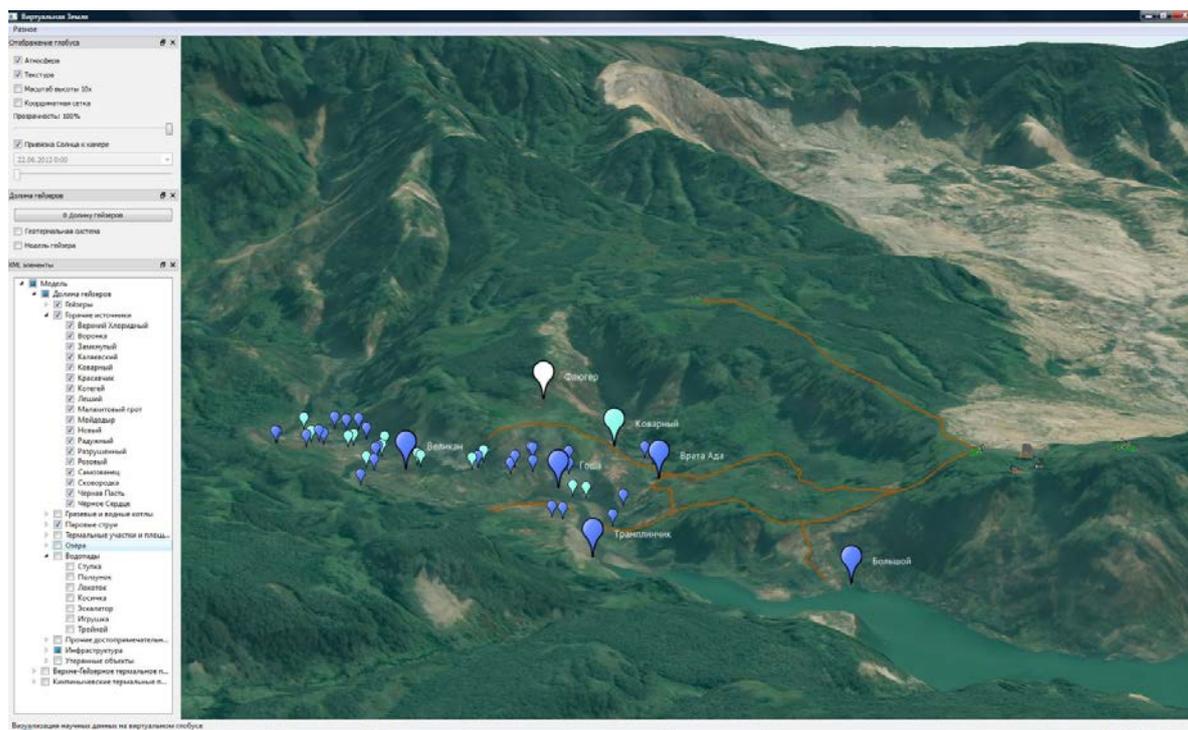


Рисунок 3.5 — Интерактивная визуализация 3D-модели рельефа в районе Долины гейзеров на Камчатке, крупный план центрального участка. Метки показывают положение объектов (гейзеров, кипящих источников и др.), при нажатии на метку открывается описание из каталога объектов.

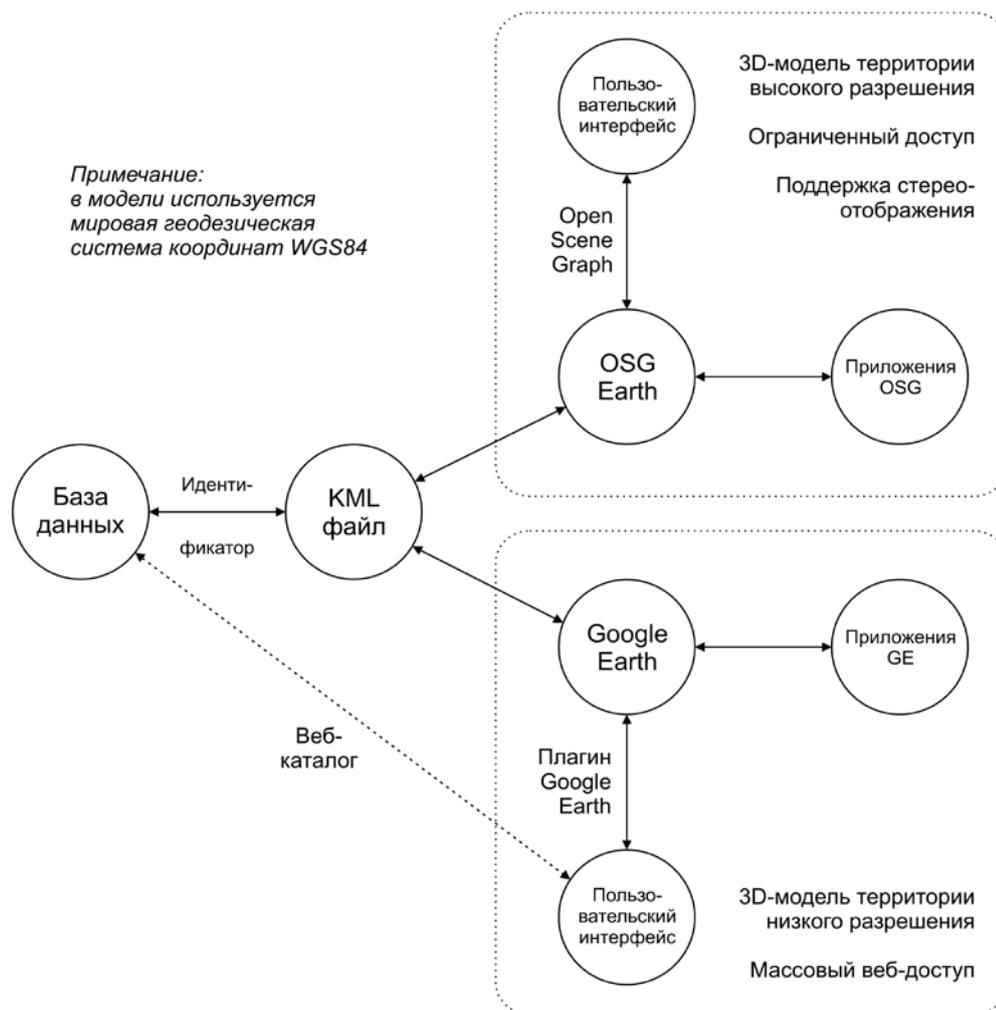


Рисунок 3.6 — Принципиальная схема 3D-документа с поддержкой двух вариантов представления (OSG – Open Scene Graph).

3D-презентация «Денисова пещера на Алтае» обеспечивает визуализацию созданной 3D-модели пещеры для образовательных и научных задач. Презентация поддерживает четыре окна для отображения 3D-моделей: «Глобус», «Пещера», «Облако находок» и «3D-модель находки». Пользователь может переключаться между окнами в произвольном порядке.

Окно «Глобус» позволяет изучить местоположение пещеры на виртуальном глобусе и окружающую местность, рисунок 3.7. Окно «Пещера» позволяет визуализировать точечную и полигональную модель пещеры, расположение деревянных настилов, перил и лестниц, а также дополнительные данные: ориентацию по сторонам света осей и сетки археологической системы координат, рисунок 3.8.

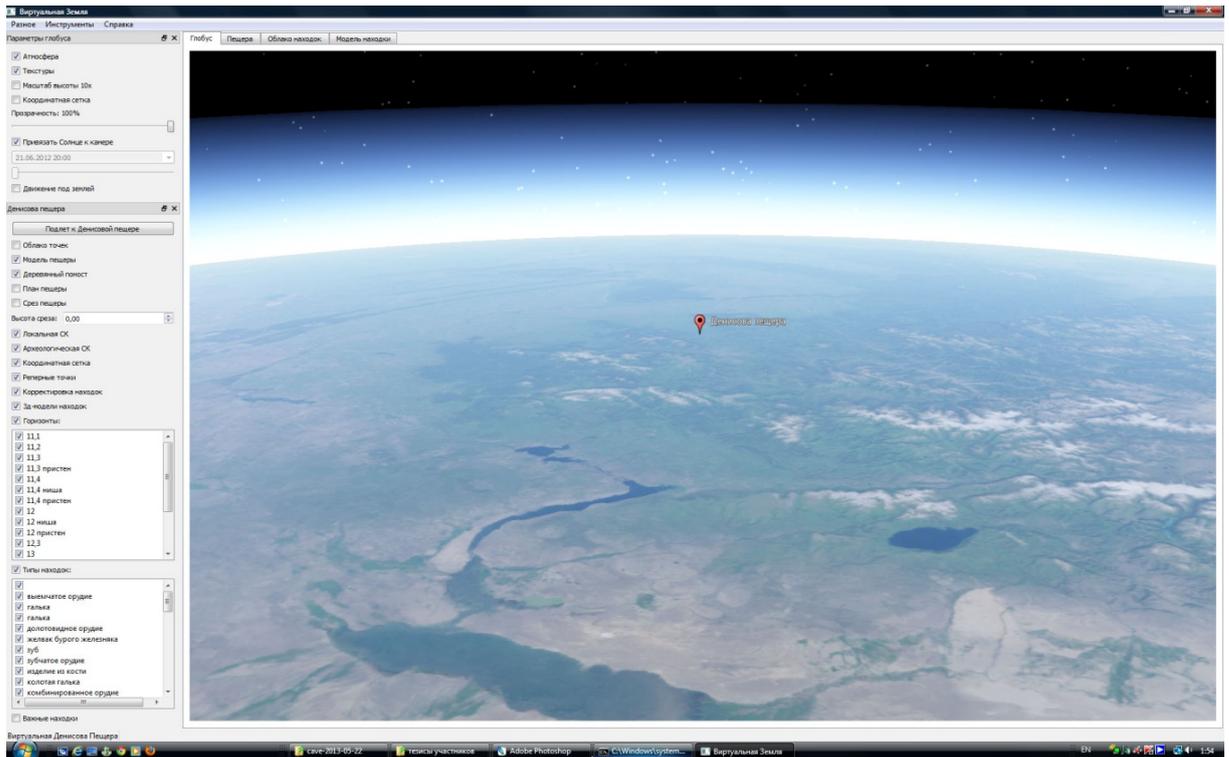


Рисунок 3.7 — Окно «Глобус». Показ местоположения пещеры на виртуальном глобусе.

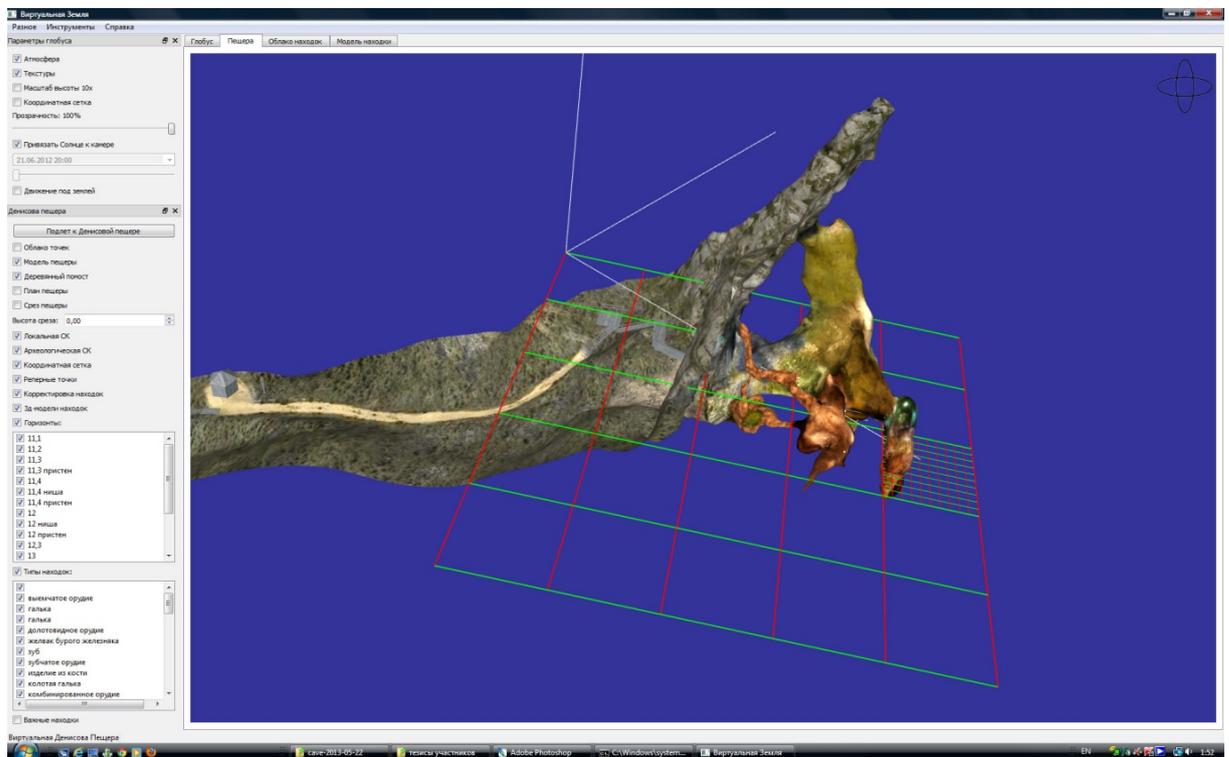


Рисунок 3.8 — Окно «Пещера». Просмотр 3D-модели Денисовой пещеры с наложенной координатной сеткой, а также визуализацией направлений вертикально вверх и на стороны света (оси белого цвета).

Реализована возможность горизонтального среза виртуальной 3D-модели на любом уровне для удобства визуального анализа геометрии пещеры и расположения находок, рисунки 3.9-3.10.

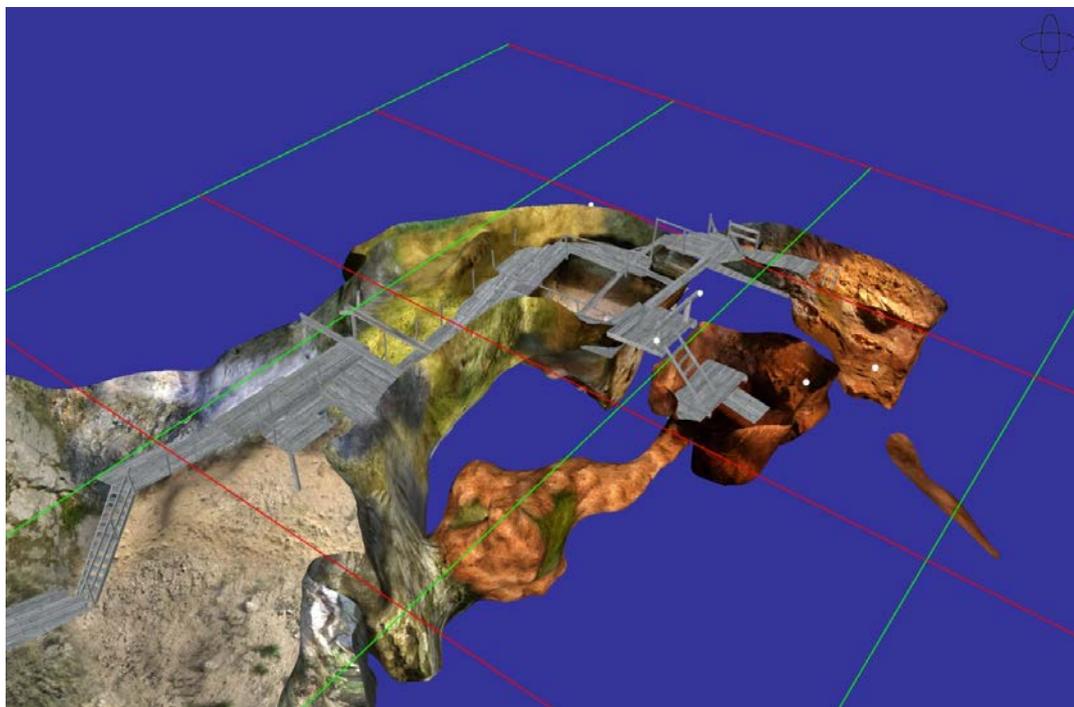


Рисунок 3.9 — Окно «Пещера». Срез 3D-модели на уровне 0 м с наложением координатной сетки.

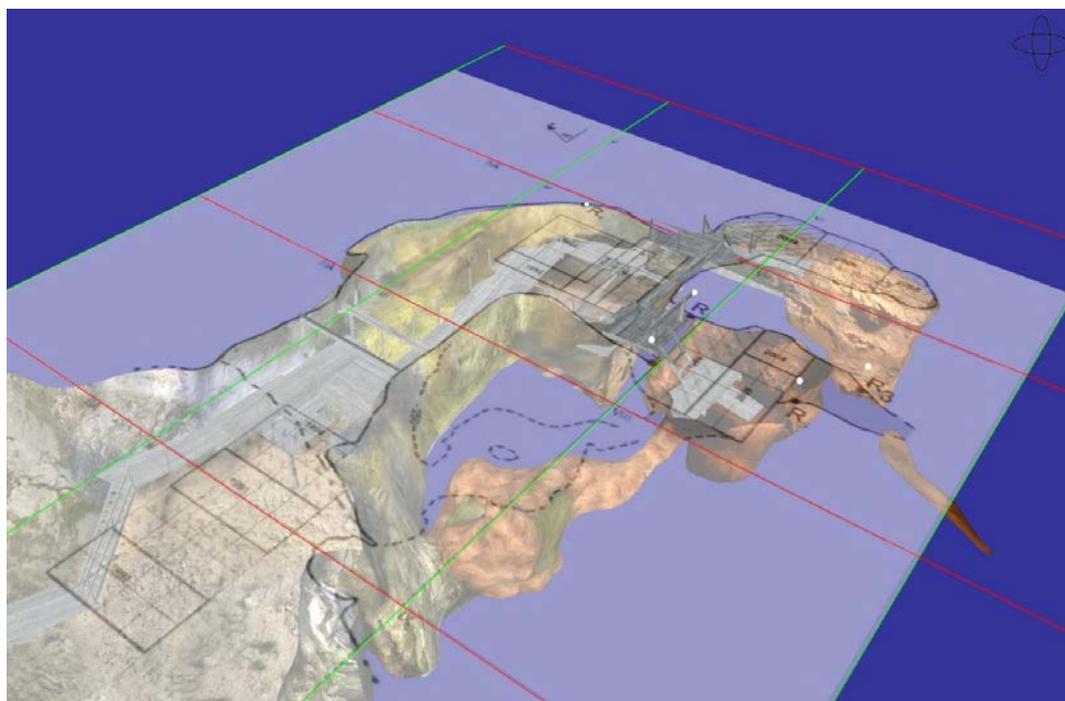


Рисунок 3.10 — Окно «Пещера». Срез 3D-модели на уровне 0 м с наложением координатной сетки и растровой схемы пещеры.

В окнах «Пещера» и «Облако находок» реализована возможность отображения и изучения пространственного расположения находок в различных археологических горизонтах. Информация из археологической базы данных (координаты находок) отображается в виде маркеров в виртуальном пространстве 3D-модели. Для ориентированных находок используются вытянутые трехмерные маркеры (эллипсоиды вращения), для находок, ориентация которых не указана – сферы.

В окне «Облако находок» реализована возможность фильтрации по номеру слоя, что позволяет изучать особенности стратиграфии и осадконакопления. В окне «Облако находок» виртуальная 3D-модель пещеры не отображается, что позволяет сосредоточиться на анализе пространственного расположения находок в археологических горизонтах (слоях), рисунки 3.11-3.12.

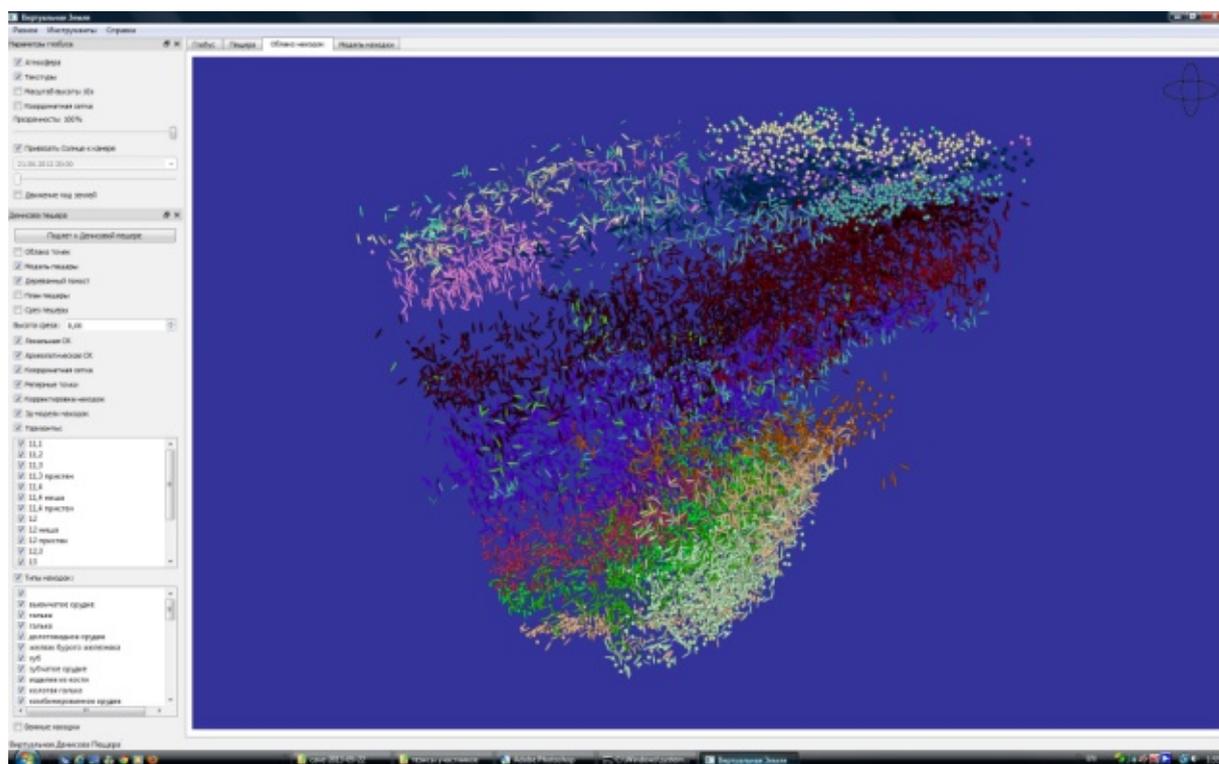


Рисунок 3.11 —Окно «Облако находок». Анализ пространственного расположения находок в различных археологических горизонтах в раскопе восточной галереи Денисовой пещеры на Алтае.

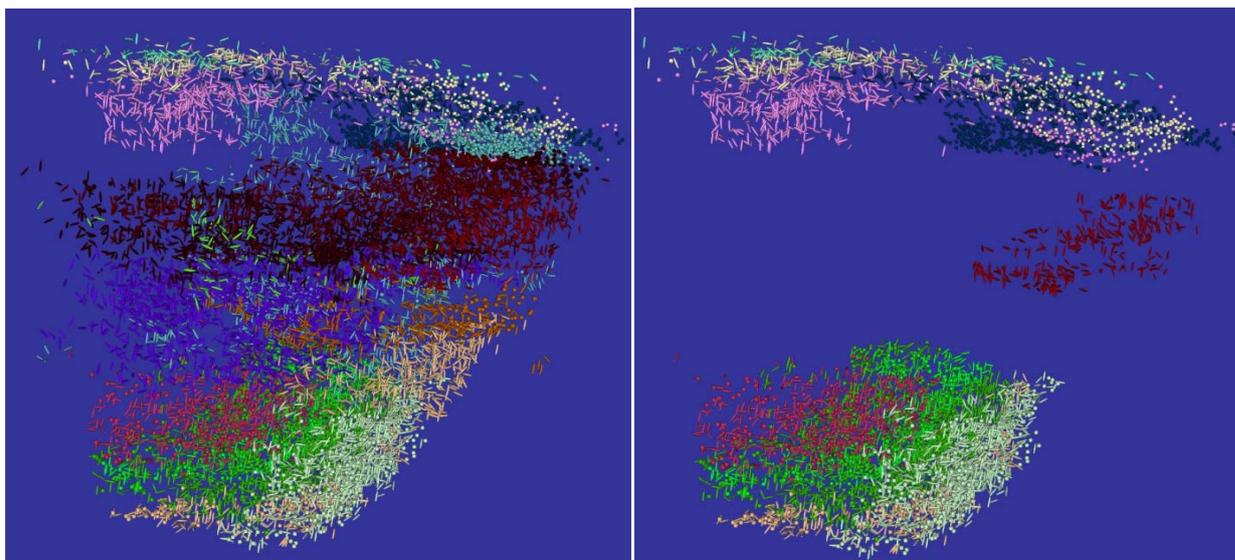


Рисунок 3.12 — «Облако находок» в раскопе восточной галереи Денисовой пещеры на Алтае. Примеры фильтрации по номеру слоя.

Каждый трехмерный маркер, визуализирующий местоположение находки, является гиперссылкой: при нажатии на него выводится соответствующая данной находке информация из археологической базы данных. Техническая реализация «нажатия» на маркер при отображении на системе виртуальной реальности в стереоскопическом режиме потребовала разработки нового подхода к навигации, который можно условно назвать имитацией лазерной указки [Бобков, 2013б]. При этом вместо курсора мыши на экране используется точка в трехмерном пространстве, имитирующая пятно от луча лазерной указки (метафора предложена В.А. Конышевым). В зависимости от опыта пользователя, можно отображать либо сам луч «указки», либо только точку его пересечения с объектом. Таким образом, в разработанном приложении был реализован интуитивно понятный механизм для взаимодействия пользователя с плотным трехмерным массивом маркеров, выделения интересующих объектов и вывода информации о них.

В окне «3D-модель находки» отображаются виртуальные 3D-модели отдельных предметов, с возможностью переключения между ними, рисунок 3.13. Таким образом, широкому кругу пользователей предоставлена

возможность «виртуально» изучать некоторые наиболее интересные археологические находки, сделанные в Денисовой пещере.

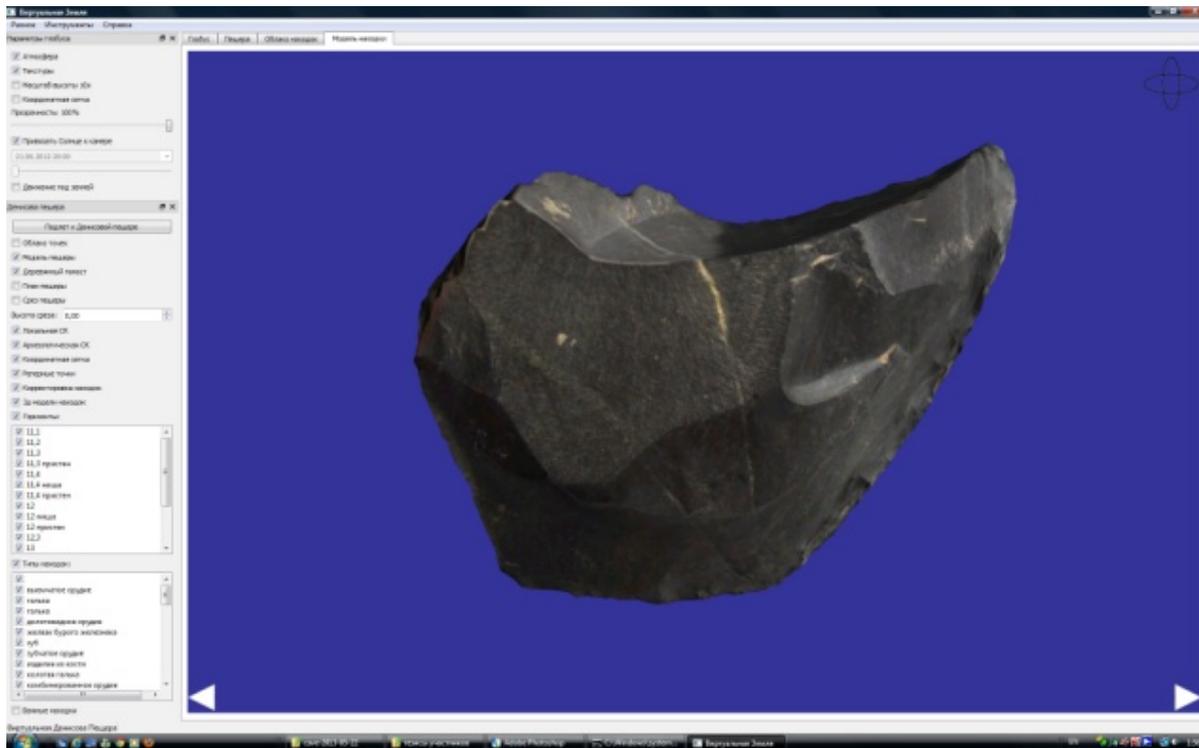


Рисунок 3.13 — Окно «3D-модель находки».

Созданная виртуальная 3D-модель Денисовой пещеры и программное обеспечение могут использоваться для решения различных научных задач. В частности, функция горизонтальных срезов с шагом в 10 см позволяет вычерчивать точнейшие планы всей карстовой полости или ее определенного участка на любой высотной отметке. Могут быть также созданы вертикальные сечения пещеры, рассчитаны объемы и измерены расстояния между объектами внутри нее. Виртуальная 3D-модель может использоваться для уточнения существующих археологических схем и создания новой топографической основы.

Виртуальная 3D-модель пещеры позволяет визуализировать взаимное расположение литологических слоев. Широкий набор фильтров в базе данных по находкам предоставляет возможность быстрого поиска любого интересующего артефакта (или группы находок) и установления его расположения в слое относительно других объектов. Существенным

дополнением является возможность визуализации и анализа горизонтальной и вертикальной ориентации находки в слое. Модель позволять выполнять планиграфический анализ в любом масштабе – от квадрата до сектора или пещеры в целом.

Также виртуальная 3D-модель может быть адаптирована для просмотра через сеть Интернет и выложена на общедоступный веб-сайт для создания виртуальной экскурсии. Это особенно актуально для Денисовой пещеры на Алтае, которая является труднодоступным для посещения объектом.

Интерфейс приложений, разработанных для визуализации подземных данных (результаты геофизических исследований) и для визуализации объектов в околоземном пространстве (орбит космических полетов) будет представлен ниже в разделе, посвященном виртуальным глобусам.

Разработанные стереоскопические 3D-презентации были апробированы на Постоянно действующей выставке достижений РАН (ПДВ РАН) в зале «Ротонда» в Новом здании Президиума РАН в 2011-2014 гг. Использовалась проекционная система виртуальной реальности на основе стереоскопического видеопроектора Barco Galaxy NW-12 Active Infitec в комплекте с набором очков Glasses Barco Infitec, и жесткого экрана в форме сегмента цилиндра высотой 2,6 м и шириной около 6 м, рисунки 3.14-3.15.

Установка виртуальной реальности в зале «Ротонда» в Новом здании Президиума РАН (Ленинский проспект, д. 32а) была создана в 2011 г. и успешно работала до 2014 г. В частности, в ходе 33-й Генеральной ассамблеи Европейской сейсмологической комиссии в 2012 г., заседания которой проходили в Новом здании Президиума РАН, 3D-презентации в зале «Ротонда» (посвященные геофизическим исследованиям) просмотрели более 500 человек за 4 дня.

К сожалению, после перехода под управление ФАНО, установка виртуальной реальности в зале «Ротонда» была демонтирована, а зал использован для других нужд.

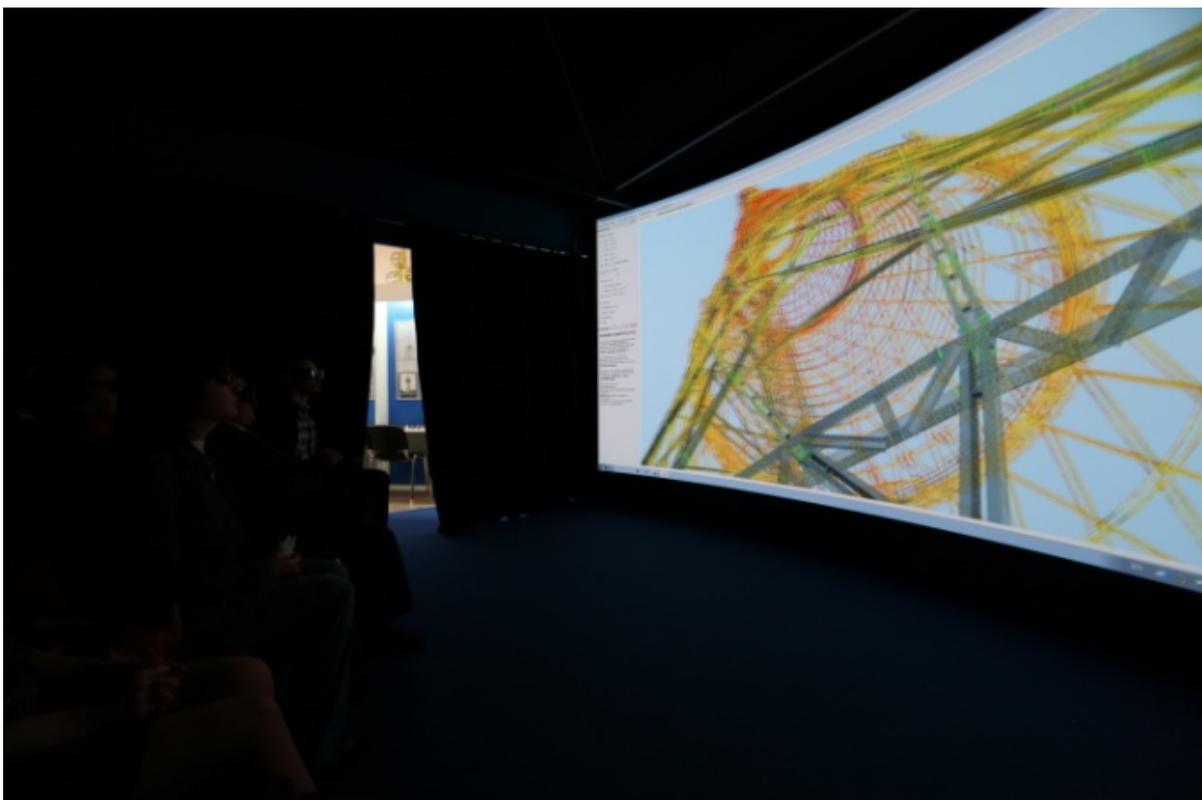


Рисунок 3.14 — Демонстрация 3D-модели Шаболовской башни на установке виртуальной реальности. 2013 г.



Рисунок 3.15 — Общий вид зрительного зала с установкой виртуальной реальности. Зрители используют очки Glasses Barco Infitec.

3.1.2 Разработка интерактивных 3D-приложений для доступа через интернет на основе Unity3D и WebGL

Интерактивные 3D-презентации для систем виртуальной реальности, описанные в предыдущей главе, имеют существенный недостаток: к ним очень сложно обеспечить массовый доступ. Большой объем таких приложений, необходимость скачивания и установки на компьютер пользователя программного обеспечения в малоизвестном формате практически исключают возможность их использования для задач массовой популяризации науки и техники.

Для обеспечения массового веб-доступа к созданным 3D-моделям был разработан прототип приложения на основе широко известного программного инструментария Unity3D, рисунки 3.16-3.18. Это веб-приложение позволяет рассматривать виртуальную 3D-модель в режиме прогулки или свободного полета, управлять отображением отдельных элементов или слоев модели (например, отображать вид объекта в различные исторические периоды или показывать различную «наложенную» на 3D-модель информацию), измерять произвольные расстояния между элементами модели. В приложении реализована также возможность установления взаимосвязи элементов виртуальной 3D-модели с базой данных, доступной через Интернет (например, вывод изображения или переход по гиперссылке при выделении элемента 3D-модели). Разработанное веб-приложение может использоваться для демонстрации различных виртуальных 3D-моделей (3D-документов), в том числе в виртуальной среде (которая может имитировать реальность или быть полностью синтетической).

Данное приложение успешно используется для демонстрации виртуальной модели Шуховской башни на Шаболовке на сайте ИИЕТ РАН, и доступно по адресу: <http://virtual.ihst.ru/unity/tower/tower.html> [Аникушкин, Леонов 2013]. Приложение позволяет рассмотреть модель башни в режиме прогулки или свободного полета, отобразить конструкцию башни в

соответствии с выбранным историческим периодом (как и приложение для систем виртуальной реальности, описанное в предыдущем разделе). Веб-приложение позволяет просматривать виртуальную 3D-модель башни через браузер, изучать конструкцию башни в разные периоды, выполнять измерение расстояний между элементами модели, рисунки 3.16-3.18.

Структура и функциональность приложения будут подробно рассмотрены в следующем разделе, где описывается его применение для решения крупной практической задачи – интерактивной визуализации 3D-модели действующей электроподстанции. К сожалению, для объектов истории науки и техники аналогичных по масштабу веб-приложений создать не удалось, ввиду отсутствия спроса и ресурсов для их разработки.

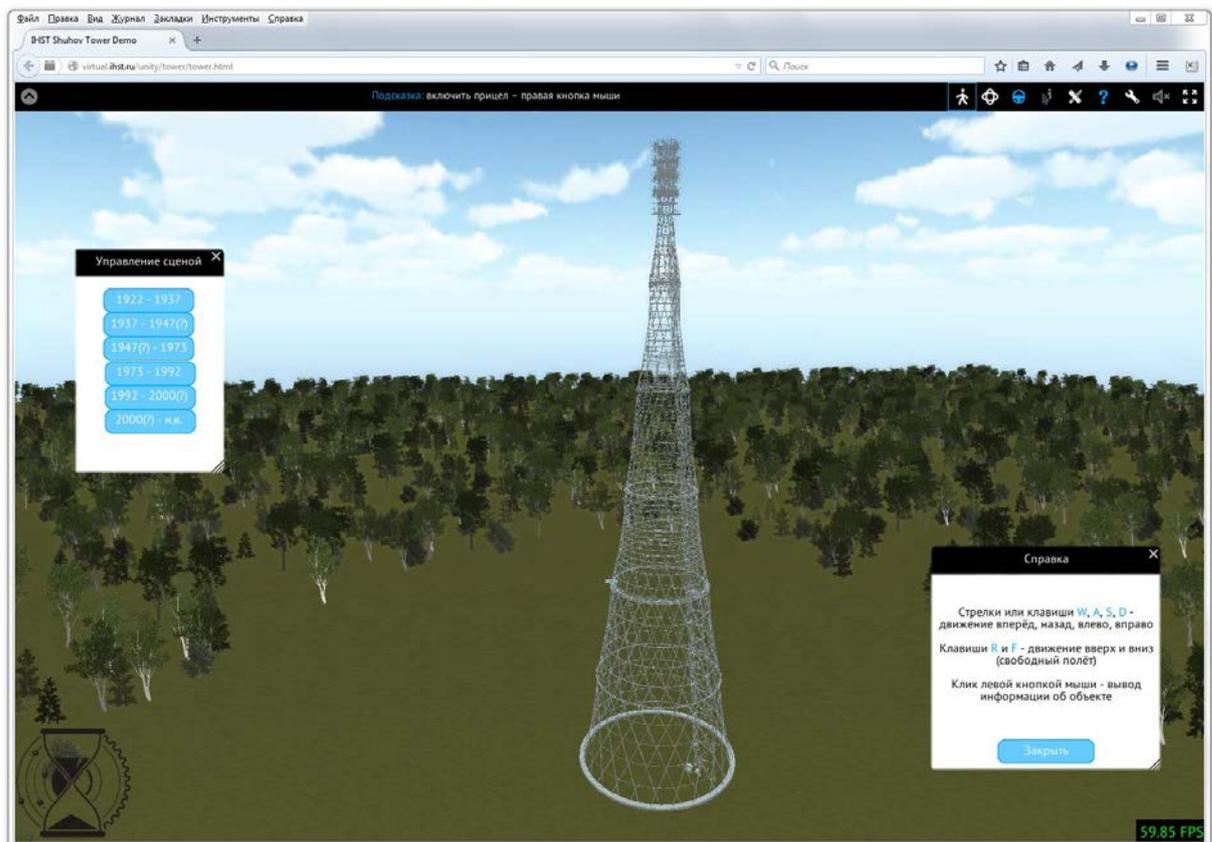


Рисунок 3.16 — Веб-приложение для интерактивной визуализации виртуальных 3D-моделей на основе Unity3D. Пример применения для визуализации 3D-модели Шуховской башни на Шаболовке. Подстилающая поверхность (модель окружающей территории) условная.

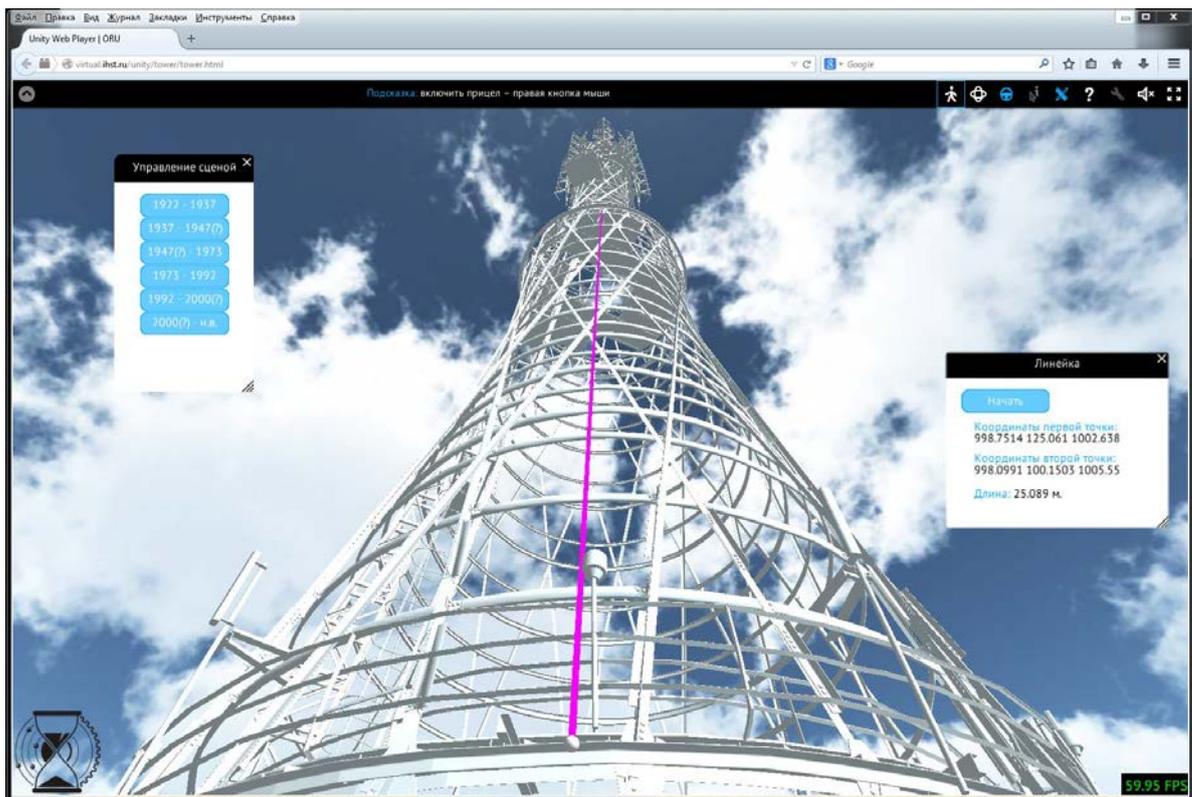


Рисунок 3.17 — Веб-приложение для интерактивной визуализации виртуальных 3D-моделей на основе Unity3D. Измерение расстояния между элементами виртуальной 3D-модели.

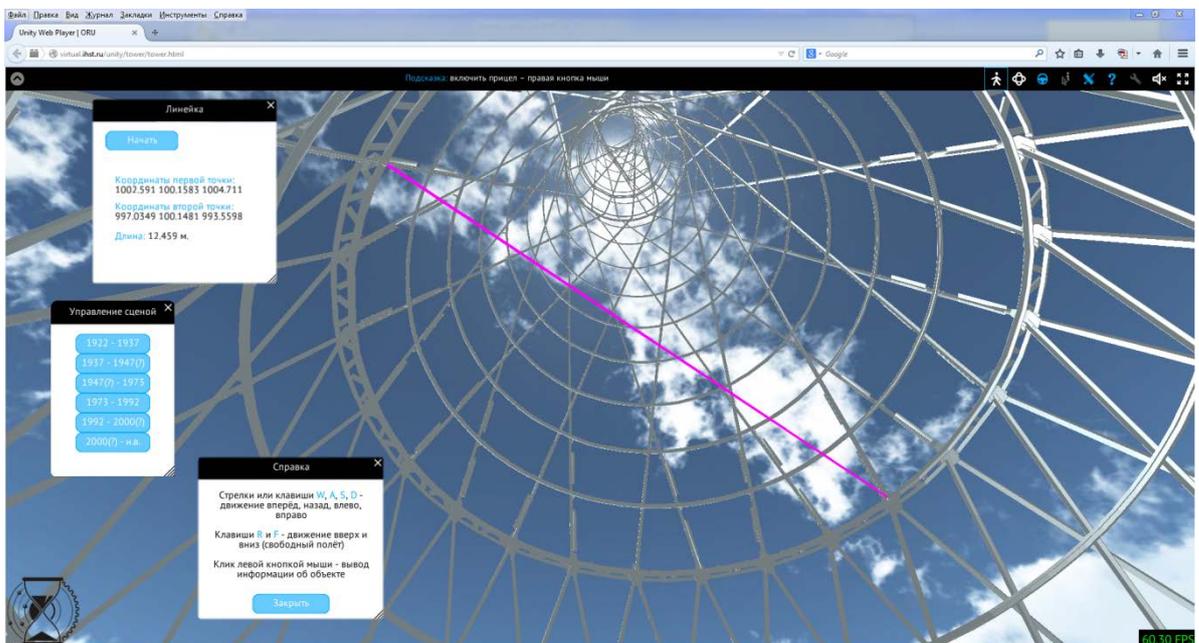


Рисунок 3.18 — Веб-приложение для интерактивной визуализации виртуальных 3D-моделей на основе Unity3D. Измерение расстояния между элементами виртуальной 3D-модели.

Приложение на основе Unity 3D также было использовано для интерактивной визуализации 3D-модели электромобиля «Колумбия», описанной выше. Интеграция веб-приложения на сайт была осуществлена посредством технологии WebGL (то есть без использования плагина). Приложение запускается при открытии в браузере веб-страницы, установка какого-либо программного обеспечения пользователем не требуется.

Приложение позволяет рассматривать 3D-модель электромобиля под произвольным ракурсом, включать и выключать отображение различных элементов автомобиля для изучения его устройства. При помощи кнопок на клавиатуре можно осуществлять управление вращением колес и поворотом рулевого механизма автомобиля. Приложение с интерфейсом на русском и английском языках доступно на сайте ИИЕТ РАН по ссылке: <http://virtual.ihst.ru/columbia.html>, рисунки 3.19-3.20.

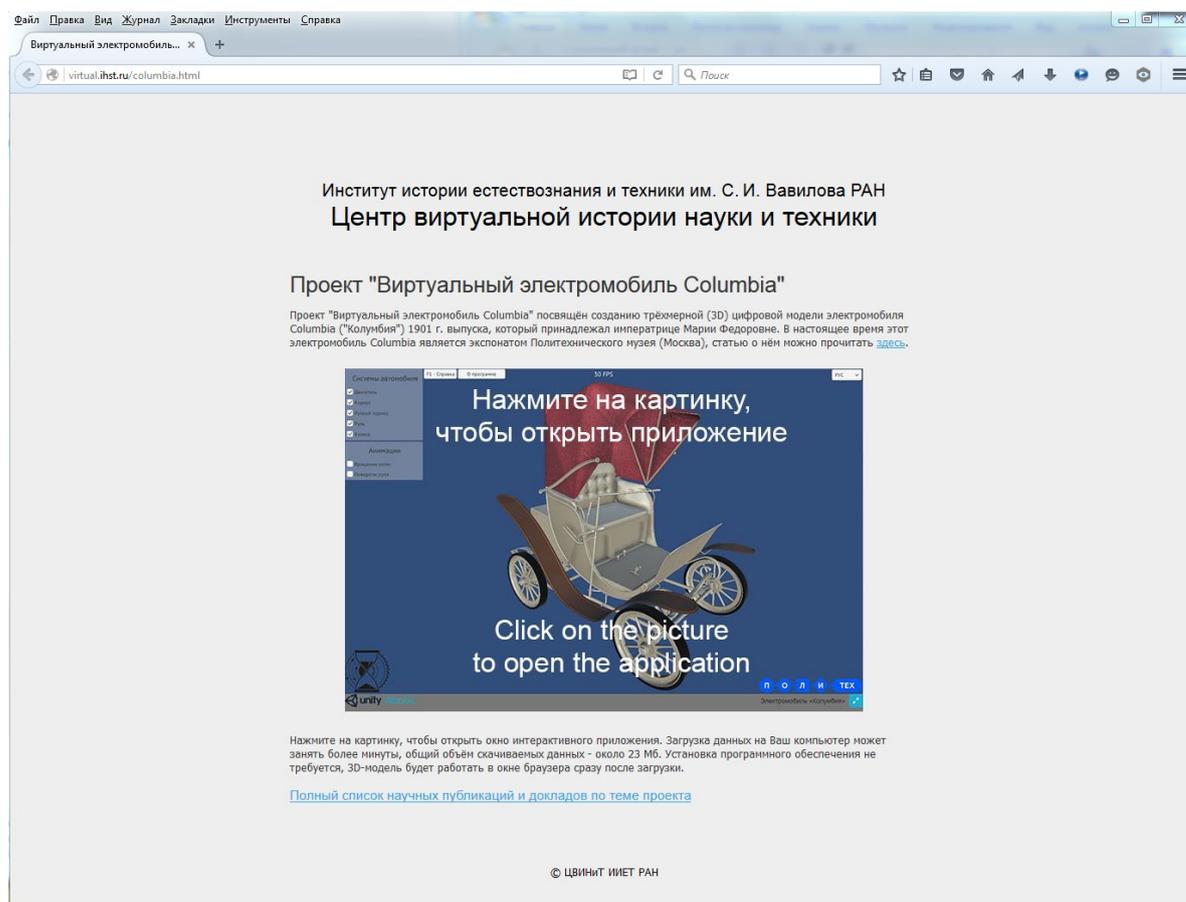


Рисунок 3.19 — Веб-приложение «Виртуальный электромобиль Columbia» на сайте ИИЕТ РАН (<http://virtual.ihst.ru/columbia.html>).

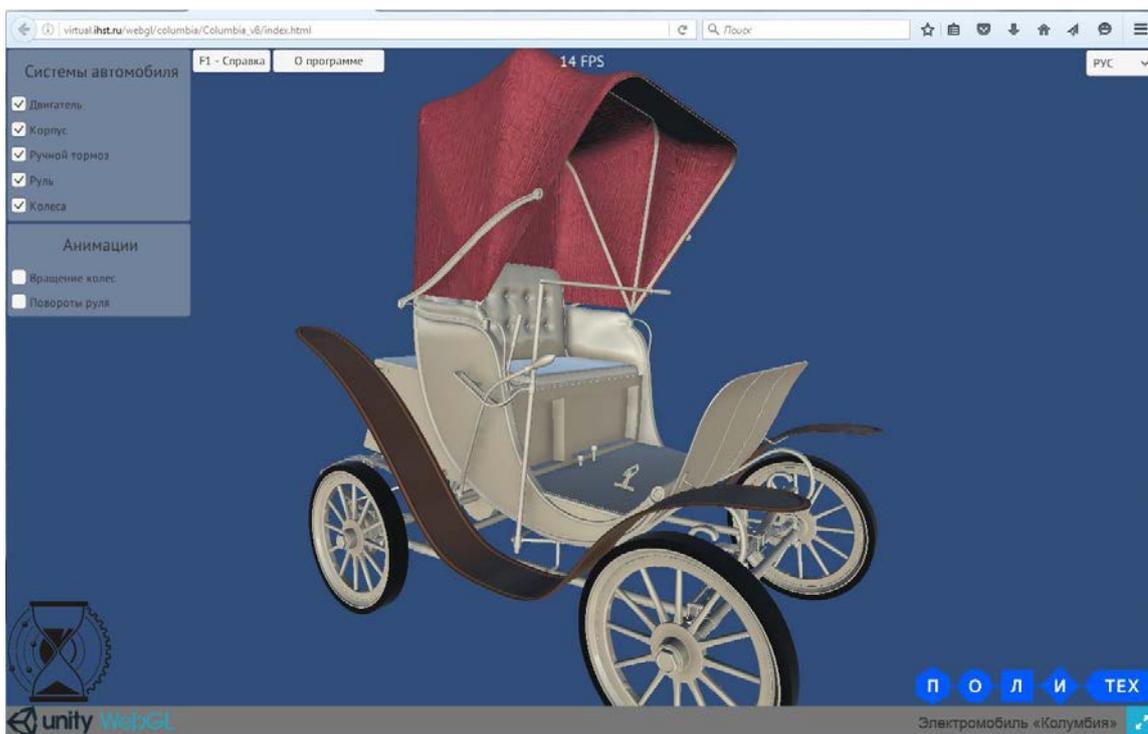


Рисунок 3.20 — Интерфейс веб-приложения «Виртуальный электромобиль Columbia». Слева вверху – панель управления просмотром отдельных элементов виртуальной 3D-модели.

3.1.3 Практическая ценность интерактивных 3D-презентаций

Разработанные методы и технологии представления виртуальных 3D-моделей и связанной с ними информации могут использоваться как основа для создания коллекции виртуальных 3D-моделей или полноценного виртуального музея. В рамках данной работы было выполнено экспериментальное исследование технологий представления трехмерных объектов на системах виртуальной реальности с поддержкой стерео режима, а также в веб-браузере на основе современных технологий отображения трехмерной графики в интернете (Unity3D, WebGL).

К сожалению, спроса на разработанные технологии со стороны музеев в ходе выполнения работ в 2011-2017 гг. найти не удалось. Также не удалось получить грантовую поддержку РФФИ или РНФ на их дальнейшее развитие. Поэтому для демонстрации потенциальных возможностей разработанного программного обеспечения, а также разработанных методов и подходов к

интерактивной 3D-визуализации крупных технических объектов, в том числе с доступом через Интернет, был выполнен коммерческий проект по интерактивной 3D-визуализации крупного промышленного объекта, который будет подробно описан в следующем разделе.

3.2 Применение интерактивных 3D-моделей (3D-презентаций) для прикладных задач

Подходы и технологии, разработанные при создании веб-приложений для демонстрации музейных образцов и памятников техники, могут успешно применяться для решения прикладных промышленных задач. Например, нами была создана интерактивная виртуальная 3D-модель подстанции 220 кВ Абакан Районная, филиала ПАО «ФСК ЕЭС» - Хакасского ПМЭС, и успешно опробована методика подготовки работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования ОРУ-110 кВ с использованием интерактивной 3D-модели. Результаты работ привлекли большой интерес специалистов и были опубликованы в ведущих отраслевых российских изданиях [Леонов, 2015ж], [Аникушкин и др., 2017], а также в ведущих зарубежных изданиях, посвященных промышленным применениям лазерного сканирования и 3D-моделирования [Leonov et al., 2016], [Leonov, Kotelnikov, 2016]. В настоящее время созданная интерактивная 3D-модель используется в качестве эксперимента при организации эксплуатации энергообъекта.

Актуальность создания виртуальной 3D-модели действующей электроподстанции обусловлена необходимостью повышения безопасности работ на энергообъектах. Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей. (СО 34.04.181-2003) предписывают: *«п. 5.1.11. Работы по ремонту и техническому обслуживанию объектов электрических сетей производятся по типовым или местным инструкциям, технологическим картам, картам организации труда, проектам производства работ».*

При подготовке проектов производства работ (ППР) специалисты предприятий эксплуатирующих электроустановки должны определить безопасную последовательность выполнения работ, пути передвижения персонала, размещения оборудования и техники на каждом из этапов производства работ. Это невозможно без четкого представления о компоновке энергообъекта, габаритных размерах оборудования, сооружений, элементов конструкций и т.п. Необходимая информация содержится в проектной документации подстанции (ПС). Большинство подстанций эксплуатируются 30, 40 или более лет и полноценное использование проектной документации не всегда возможно в виду ее ветхости или частичной утраты. В результате для составления качественной документации требуется выезд специалиста непосредственно на объект.

В обычной практике специалист энергопредприятия проводит замеры на поверхности земли, пытаясь определить расстояния между элементами электрооборудования и конструкций, расположенных на значительной высоте. Такие замеры проводятся, когда оборудование еще не выведено в ремонт и специалист должен учесть изменение положения коммутационных аппаратов. На основе проведенных измерений строятся эскизы и чертежи рабочих зон. Особой точностью такие построения отличаться не могут, и результат полностью зависят от квалификации, опыта работы специалиста. Таким образом, процесс определения зон возможного безопасного производства работ в значительной мере зависит от субъективных факторов.

Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок устанавливают допустимые расстояния до токоведущих частей электроустановок находящихся под напряжением. То есть при выполнении работ не допускается приближение к токоведущим частям, находящимися под напряжением, на расстояние менее допустимого. В процессе проведения работ расстояния измерять затруднительно, и работник должен полностью полагаться на визуальное восприятие допустимого габарита. Следует

вспомнить, какова точность измерений. В связи с этим работник вынужден в значительной мере руководствоваться собственным опытом.

В результате изучения существующей практики организации ремонтных работ и действующих нормативных документов выявлены типовые недостатки в организации работ по техническому обслуживанию и ремонту на электросетевых объектах:

- проекты производства работ недостаточно точны;
- безопасность производства работ в большой степени зависит от субъективных факторов (знание компоновки открытого распределительного устройства (ОРУ), опыт работы в данной электроустановке и квалификации работника).

Наименьшим из недостатков существующей методики разработки ППР является высокие затраты. В зависимости от сложности работ трудозатраты на разработку одного ППР могут составлять от 3 до 5 и более рабочих дней. Большая часть из которого уходит на составление планов и чертежей. Кроме этого в обязательном порядке потребуется выезд на объект для проведения натурных измерений.

Для оценки возможности повышения эффективности подготовки ремонтных работ, на ОРУ-110 кВ ПС 220 кВ Абакан Районная филиала ПАО «ФСК ЕЭС» - Хакасское ПМЭС был успешно выполнен пилотный проект по созданию интерактивной 3D-модели.

Сначала по результатам лазерного сканирования была создана точная и детальная 3D-модель подстанции. Затем на основе полученной 3D-модели создано интерактивное приложение на основе 3D-инструментария Unity3D. Оператор может работать с этим интерактивным приложением на любом компьютере без специальной подготовки.

3.2.1 Создание интерактивной 3D-модели действующего технического объекта (электростанции)

Наземное лазерное сканирование промышленных объектов стало стандартной технологией съемки для создания трехмерных САПР моделей и документирования объектов. Однако, в настоящее время для многих предприятий применение «тяжелых» статичных 3D-моделей, доступ к которым могут получить лишь специалисты в дорогостоящих САПР-системах, не достаточно и не эффективно.

Руководители и специалисты предприятий заинтересованы в создании простых интерактивных 3D-моделей, доступных широкому кругу пользователей без использования специальных САПР-систем, для более эффективного решения задач эксплуатации объектов, планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту, а также обеспечения безопасности производства работ в действующих электроустановках.

Потенциал современных технологий лазерного сканирования, трехмерной интерактивной компьютерной графики и программных возможностей позволяет создавать такие визуально-наглядные приложения.

Работы по лазерному сканированию подстанции проводились с использованием лазерного сканера Leica P20, позволяющего определять местоположение в пространстве сотен тысяч точек в секунду с точностью в несколько миллиметров. Было отсканировано 2 гектара площади объекта с использованием сканера Leica P20 с 37 позиций в июне 2014 г., рисунок 3.21.

Расстояние между точками в облаке точек составило несколько миллиметров, что обеспечило избыточное количество точек. Поэтому, трехмерная точечная модель («облако точек» лазерного сканирования) была прорежена, после чего была импортирована в программное обеспечение Leica Cyclone для дальнейшей обработки.



Рисунок 3.21 — Лазерное сканирование электрической подстанции.

Массив полученной информации – трехмерная точечная модель, или «облако точек» - был преобразован в геометрические 3D модели.

После создания геометрической 3D-модели на основе облака точек, модель была текстурирована. Для того чтобы оптимизировать интерактивную визуализацию в реальном времени, число полигонов было уменьшено путем слияния или упрощения 3D-мешей, что в итоге дало набор данных размером 300 Мб. Такой небольшой размер модели обеспечивает быструю и плавную визуализацию даже на низкопроизводительных компьютерах. Упрощение не повлияло на требуемую точность: глобальная точность составила 2 см, локальная точность – лучше, чем 1 см.

Трехмерное полигональное моделирование подстанции было выполнено в программном обеспечении Blender 3D. Общий вид виртуальной 3D-модели электроподстанции показан на рисунках 3.22-3.23.

Blender 3D – это бесплатное программное обеспечение с открытым исходным кодом, которое позволяет создавать 3D-модели и взаимодействовать с 3D-моделями, а также создавать интерактивные приложения. Код Blender 3D развивается с середины 1990-х гг. и свободно доступен с 2002 г.. Blender3D имеет более чем 500 тыс. пользователей во всем мире и продолжает постоянно развиваться. Среди бесплатно доступных

средств моделирования, это возможно одно из лучших для создания сложных 3D-моделей и подготовки сцен для 3D-движков.



Рисунок 3.22 — Общий вид 3D-модели электроподстанции с уровня земли

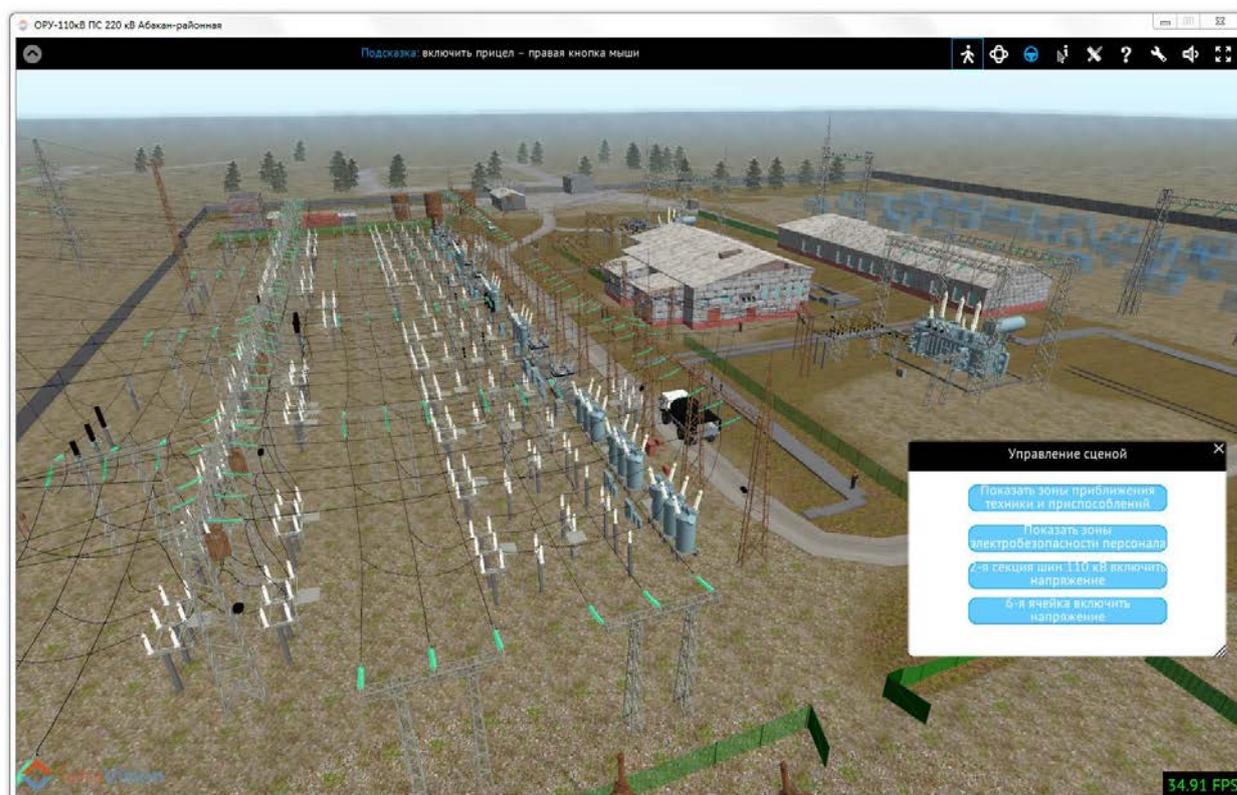


Рисунок 3.23 — Общий вид 3D-модели электроподстанции с высоты «птичьего полета»

3D-модель объекта была дополнена зонами электробезопасности в соответствии с действующими стандартами и нормативами. Размер этих зон зависит не только от напряжения проводника (чем больше напряжение – тем больше размер), но и от типа объекта, который перемещается по сцене. Зоны безопасности для людей меньше, чем для транспортных средств. Разные типы зон электробезопасности были смоделированы и визуализированы в сцене как полупрозрачные трубки вокруг проводников, рисунок 3.24.

Опасные зоны для машин окрашены в голубой цвет, а для рабочих – в красный цвет. Для целей анимации были также созданы виртуальные 3D-модели транспортных средств и рабочих, которые пользователь может перемещать по виртуальной территории подстанции.

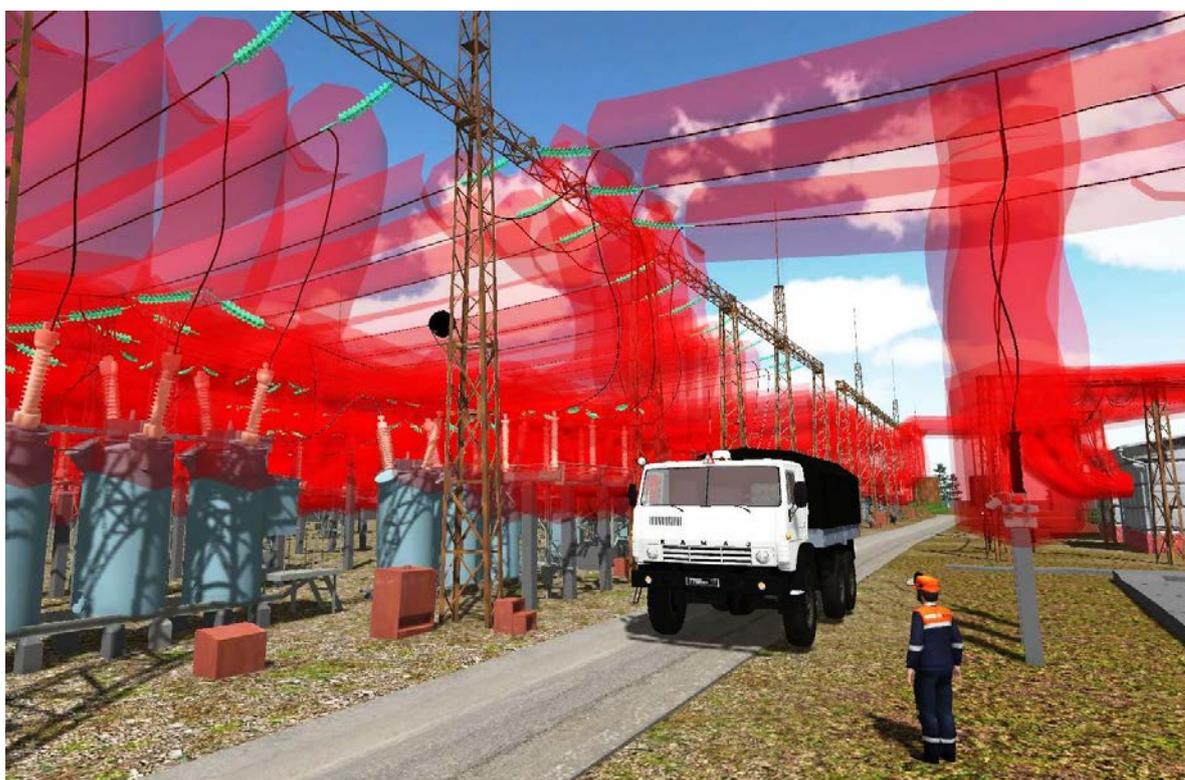


Рисунок 3.24 — Визуализация зон электробезопасности. Опасные зоны смоделированы и визуализированы как полупрозрачные трубки вокруг проводников (токоведущих проводов). Опасные зоны для рабочих окрашены в красный цвет, для техники – в синий (не показаны на рисунке).

3.2.2 Разработка интерфейса для взаимодействия с интерактивной 3D-моделью технического объекта

Сценарное окружение и интерфейс для работы с созданной 3D-моделью были созданы с помощью программного инструментария Unity 3D. Этот инструментарий развивается с 2005 г. и применяется в основном для разработки компьютерных игр. Для разработки приложения использовалась продвинутая версия Unity 3D Pro, которая потребовала приобретения лицензии. Однако для использования приложения приобретения лицензии не требуется, поскольку базовая функциональность Unity 3D находится в свободном доступе. Созданное пользовательское приложение может запускаться бесплатно на любом компьютере, самостоятельно (как автономное приложение) или в браузере (для чего требуется однократно установить на пользовательский компьютер плагин Unity3D для браузера).

Созданное программное обеспечение (3D-приложение) обеспечивает следующие основные функции:

1. Свободное перемещение по виртуальной 3D-модели подстанции в разных режимах: прогулка, свободный полет, осмотр объекта с фиксацией центра осмотра и масштабированием.
2. Просмотр и редактирование атрибутивной информации об элементах виртуальной 3D-модели, сохранение этой информации в базе данных.
3. Измерение расстояний между любыми элементами виртуальной 3D-модели («линейка», «вертикальная линейка»), автоматическое построение кратчайшего расстояния между движимыми объектами и токоведущими проводами.
4. Включение и выключение видимости зон безопасности электрооборудования.
5. Перемещение по пространству виртуальной 3D-модели подстанции виртуальных 3D-моделей машин и рабочих (движение в горизонтальной плоскости, вращение вокруг вертикальной оси).

6. Предупреждение при попадании движимого объекта в зону безопасности (подсветка, звуковой сигнал, текстовая надпись).

7. Формирование скриншотов (копий экрана) в перспективной проекции или в ортографической проекции без перспективных искажений (с возможностью независимого управления передней и задней плоскостями отсечения в ортографической проекции).

Рассмотрим данные функции и их реализацию в интерфейсе приложения более подробно.

Общий вид интерфейса. Общий вид интерфейса интерактивного приложения показан на рисунке 3.25.



Рисунок 3.25 — Общий вид интерфейса интерактивного приложения «Электроподстанция «Абакан-районная» (Unity3D). Описание элементов интерфейса, обозначенных номерами 1-14, приведено ниже.

Описание элементов интерфейса:

1 – название приложения

2 – свернуть / развернуть плашку меню

3 – поле текстовой подсказки

4 и 5 – режим перемещения (действующий режим выделен рамкой)

4 – режим прогулки и полета 

5 – режим осмотра 

6-10 – развернуть/ свернуть окна интерфейса:

6 – окно «Управление сценой» 

7 – окно «Информация об объектах» 

8 – окно «Линейки и надписи» 

9 – окно «Справка» 

10 – окно «Служебные настройки» 

11 – включить / выключить звук

12 – включить / выключить полноэкранный режим

13 – логотип производителя приложения

14 – количество кадров в секунду (служебная информация)

Перемещение по сцене. В приложении предусмотрено два режима перемещения: режим прогулки и полета, и режим осмотра. Можно в любой момент переключаться между ними.

В режиме *прогулки и полета* для перемещения используются кнопки клавиатуры:

w или стрелка ↑ – вперед

s или стрелка ↓ – назад

a или стрелка ← – влево

d или стрелка → – вправо

r – вверх

f – вниз

q – поворот влево

e – поворот вправо

Мышь может находиться в двух состояниях: управление направлением взгляда, или управление курсором. Переключение между ними осуществляется нажатием на правую кнопку мыши.

В состоянии управления направлением взгляда, по центру экрана отображается значок «прицела», и движение мыши управляет направлением взгляда. Курсор мыши при этом на экране не отображается.

В состоянии управления курсором, на экране отображается курсор, и движение мыши управляет курсором. При этом можно использовать курсор для нажатия на кнопки меню приложения, либо вообще переместить курсор за пределы окна приложения.

При «взлете» над поверхностью земли, скорость перемещения увеличивается (пропорционально высоте подъема). Чтобы быстро перемещаться по сцене, удобнее «летать» на некоторой высоте, а не «бегать» по поверхности.

В режиме *осмотра*, можно вращать виртуальную 3D-модель целиком, двигая мышь с зажатой левой кнопкой, а также приближаться / удаляться к модели, вращая колесико мыши.

Взаимодействие с объектом. Некоторые объекты (например, виртуальные 3D-модели транспортных средств или людей) можно перемещать и вращать, рисунок 3.26. Для этого нужно:

- перевести мышь в состояние управления курсором
- подняться над поверхностью земли на высоту не менее 10 м
- чтобы выбрать объект, нужно навести на него курсор мыши и нажать один раз на левую кнопку мыши (при этом выбранный объект подсветится желтым цветом)
- чтобы перемещать выбранный объект, нужно навести на него курсор мыши, нажать и удерживать зажатой левую кнопку мыши, и перемещать мышью
- чтобы вращать выбранный объект, нужно вращать колесико мыши

- чтобы снять выделение с объекта, нужно привести курсор мыши на любое свободное место (например, на землю рядом с объектом) и нажать один раз на левую кнопку мыши

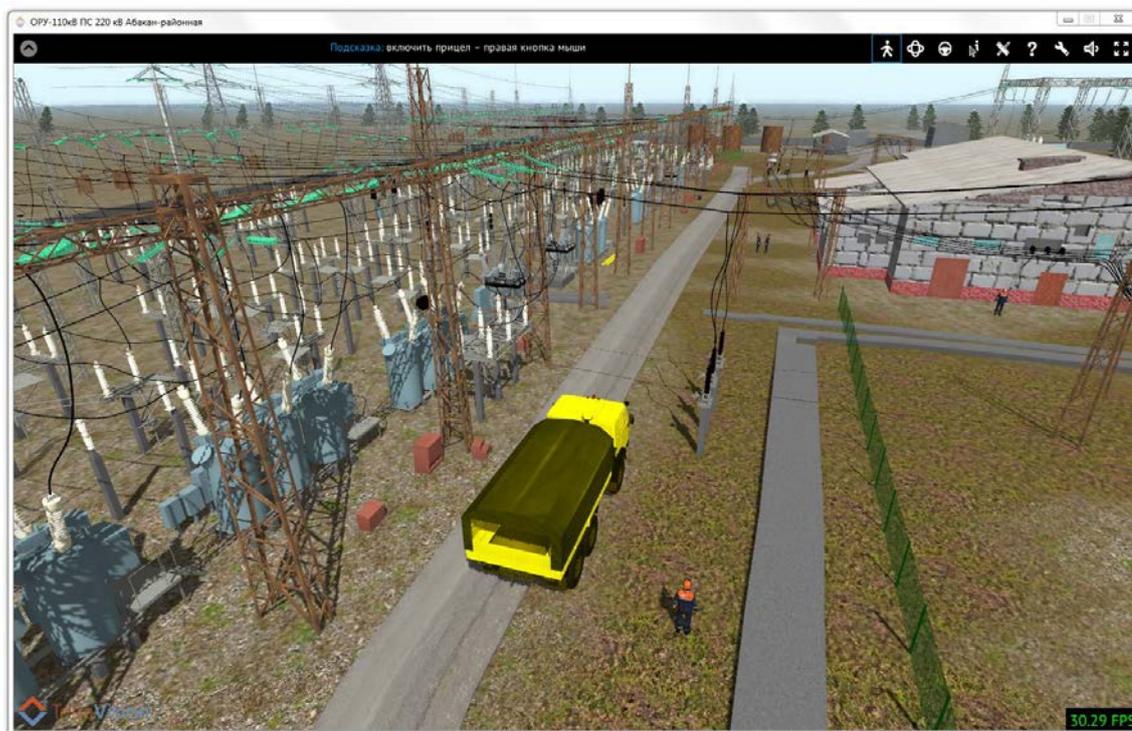


Рисунок 3.26 — Выбранное транспортное средство подсвечено желтым цветом. Его можно перемещать и вращать вокруг своей оси.

Окно «Управление сценой». Для того чтобы открыть окно «Управление сценой», нужно привести курсор на иконку окна «Управление сценой» в меню —  — и нажать на левую кнопку мыши. Откроется окно меню «Управление сценой», рисунок 3.27.

Кнопки «Показать/скрыть зоны приближения техники и приспособлений» и «Показать/скрыть зоны электробезопасности персонала» позволяют включить / выключить видимость зон электробезопасности.

Зона меньшего размера (для персонала) отображается полупрозрачной красной оболочкой вокруг проводов и изоляторов; зона большего размера (для техники) - полупрозрачной синей оболочкой, рисунок 3.28.

При попадании в зону безопасности срабатывает оповещение:

1) Для моделей людей и машин - звуковое оповещение и красная подсветка;

2) Для оператора – звуковое оповещение и всплывающая красная надпись.

Оповещение о попадании в зону безопасности срабатывают независимо от того, включена ли видимость зон безопасности или нет.

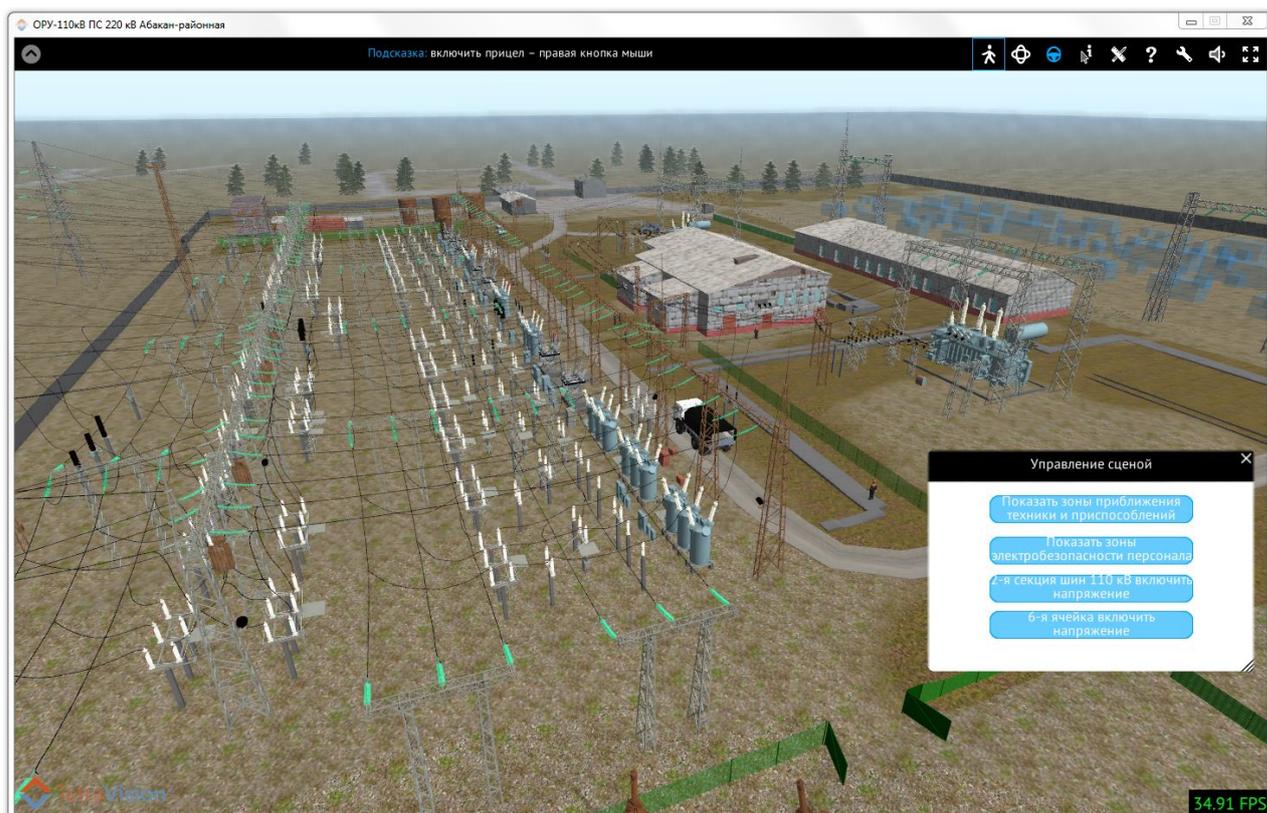


Рисунок 3.27 — Интерфейс приложения. Включено окно «Управление сценой».



Рисунок 3.28 — Включено отображение зон электробезопасности

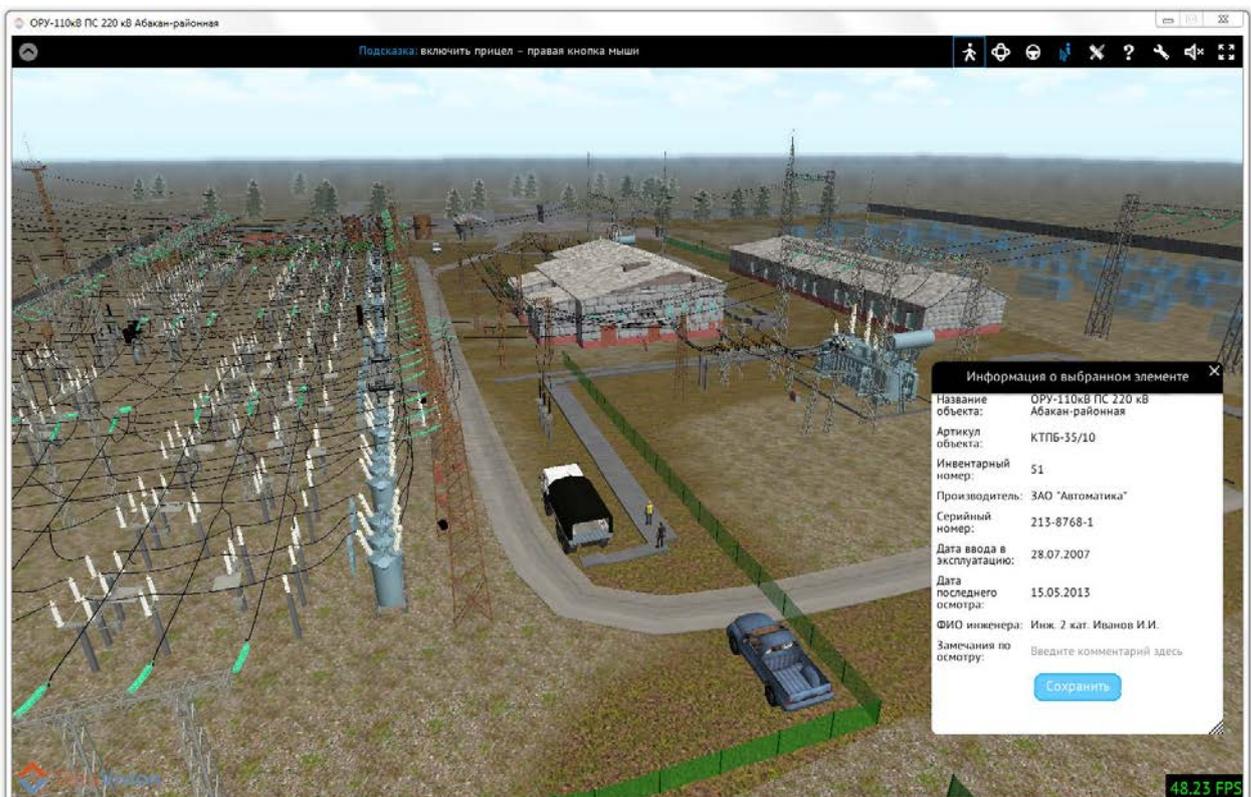


Рисунок 3.29 — Включено окно «Информация об объектах»

Окно «Информация об объектах». Для того чтобы открыть окно меню «Информация об объектах», нужно привести курсор на иконку окна «Информация об объектах» в меню —  — и нажать на левую кнопку мыши. Откроется окно меню «Информация об объектах», рисунок 3.29.

Чтобы выбрать объект, нужно привести на него курсор мыши и нажать на левую кнопку мыши. Выделенный объект подсветится желтым цветом, а информация о нем отобразится в окне «Информация об объектах».

Окно «Линейки и надписи». Для того чтобы открыть окно меню «Линейки и надписи», нужно привести курсор на иконку окна «Линейки и надписи» в меню —  — и нажать на левую кнопку мыши. Откроется окно меню «Линейки и надписи», рисунок 3.30.

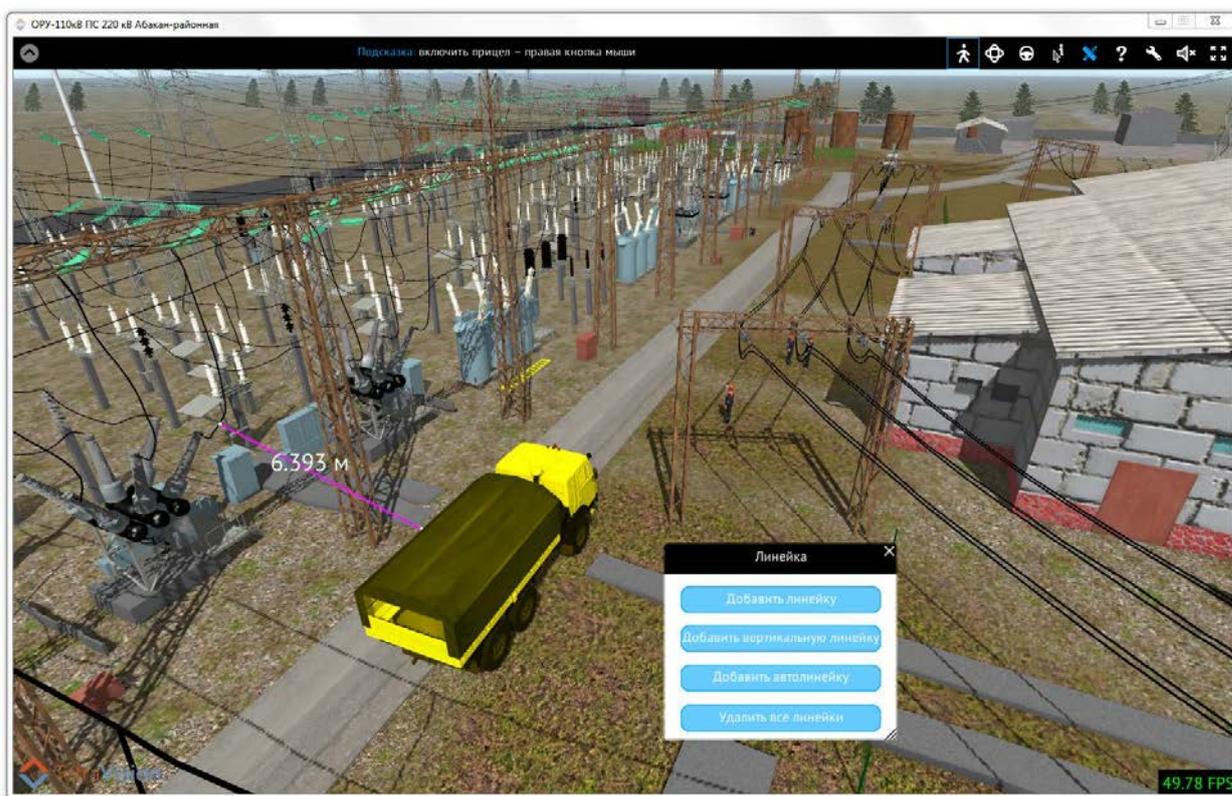


Рисунок 3.30 — Включено окно «Линейки и надписи»

Чтобы добавить линейку, нужно нажать кнопку «Добавить линейку». После этого нужно привести курсор мыши на точку, где должен располагаться кончик линейки, и нажать левую кнопку мыши. В выбранной точке появится маркер (белый шарик). Затем нужно привести курсор мыши на точку, где

должен располагаться другой кончик линейки, и снова нажать левую кнопку мыши. В выбранной точке появится маркер (белый шарик), и между двумя маркерами появится линейка с размерной надписью.

Положение кончиков установленной линейки можно менять. Для этого нужно привести курсор мыши на кончик линейки (белый шарик), положение которого необходимо изменить, и нажать левую кнопку мыши. Выделенный шарик подсветится желтым цветом. После этого нужно привести курсор мыши на новую точку, где должен располагаться кончик линейки, и нажать левую кнопку мыши.

Чтобы добавить вертикальную линейку, нужно нажать кнопку «Добавить вертикальную линейку». После этого нужно привести курсор мыши на точку, где должен располагаться кончик линейки, и нажать левую кнопку мыши. Автоматически будет построена вертикальная линейка от выбранной точки до уровня земли. У вертикальной линейки можно менять только положение верхнего кончика; нижний кончик при этом перемещается автоматически.

Функция «Автолинейка» позволяет автоматически найти минимальное расстояние между объектом (рабочим или машиной) и ближайшим токоведущим проводом, и построить соответствующую линейку. Для этого нужно нажать кнопку «Добавить автолинейку» и выбрать объект (машину или рабочего) – после этого автолинейка построится автоматически. Автолинейка автоматически пропадает при перемещении объекта, для которого она была построена.

Чтобы добавить новую линейку, нужно снова нажать кнопку «Добавить линейку». Количество линеек в сцене не ограничено.

При закрытии окна «Линейки и надписи», линейки остаются в сцене. Чтобы удалить линейки, нужно нажать кнопку «Удалить все линейки».

Для построения линейки к модели рабочего или машины используется не сама 3D-модель объекта, а ее коллайдер (дополнительный невидимый объект более простой геометрии, внутри которого помещена модель). Форма

коллайдера близка к геометрии модели, но не совпадает с ней. Это может приводить к тому, что конец линейки «висит в воздухе» рядом с поверхностью модели.

Окно «Справка». Для того чтобы открыть окно «Справка», нужно привести курсор на иконку окна «Справка» в меню —  — и нажать на левую кнопку мыши. Откроется окно меню «Справка», рисунок 3.31. В окне справки отображается информация о способах управления в выбранном режиме управления (режим прогулки и полета или режим осмотра).

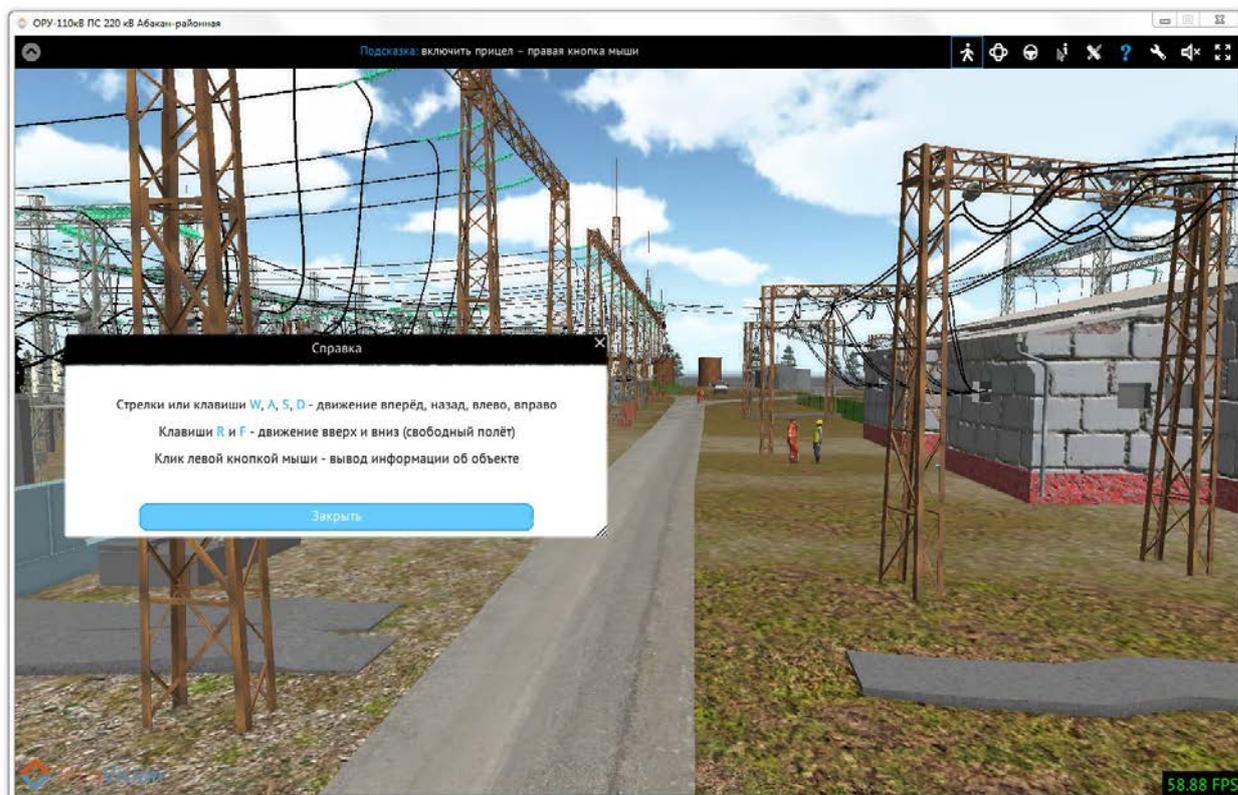


Рисунок 3.31 — Включено окно «Справка».

Окно «Служебные настройки». Для того чтобы открыть окно меню «Служебные настройки», нужно привести курсор на иконку окна «Служебные настройки» в меню —  — и нажать на левую кнопку мыши. Откроется окно меню «Служебные настройки», рисунок 3.32.

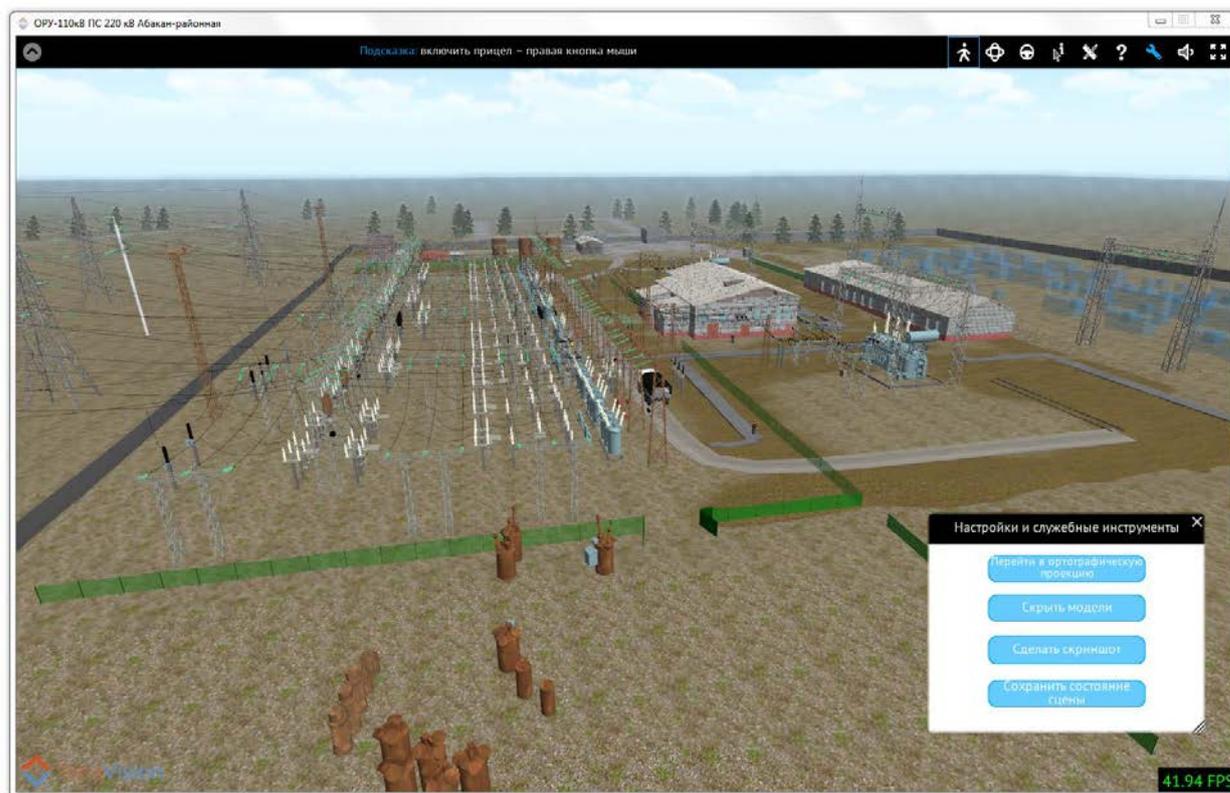


Рисунок 3.32 — Включено окно «Служебные настройки»

Кнопки «Перейти в ортографическую проекцию» / «Перейти в перспективную проекцию» позволяют изменять способ отображения трехмерной модели на двумерном экране.

По умолчанию, модель отображается на экран в перспективной проекции, т.е. размер предмета на экране уменьшается по мере удаления предмета от экрана (перспективное искажение), рисунок 3.32.

В ортографической проекции, перспективное искажение отключено, и одинаковые предметы отображаются на экране одинаково вне зависимости от расстояния до них, рисунок 3.33.

В ортографической проекции, перемещение камеры вперед не позволяет «приблизиться» к объекту, т.к. размер объекта на экране не зависит от расстояния до него. Аналогом приближения (зума) в ортографической проекции является изменение размера области, отображаемой на экране. Размер области, отображаемой на экране, можно менять, вращая колесико мыши, рисунок 3.34.

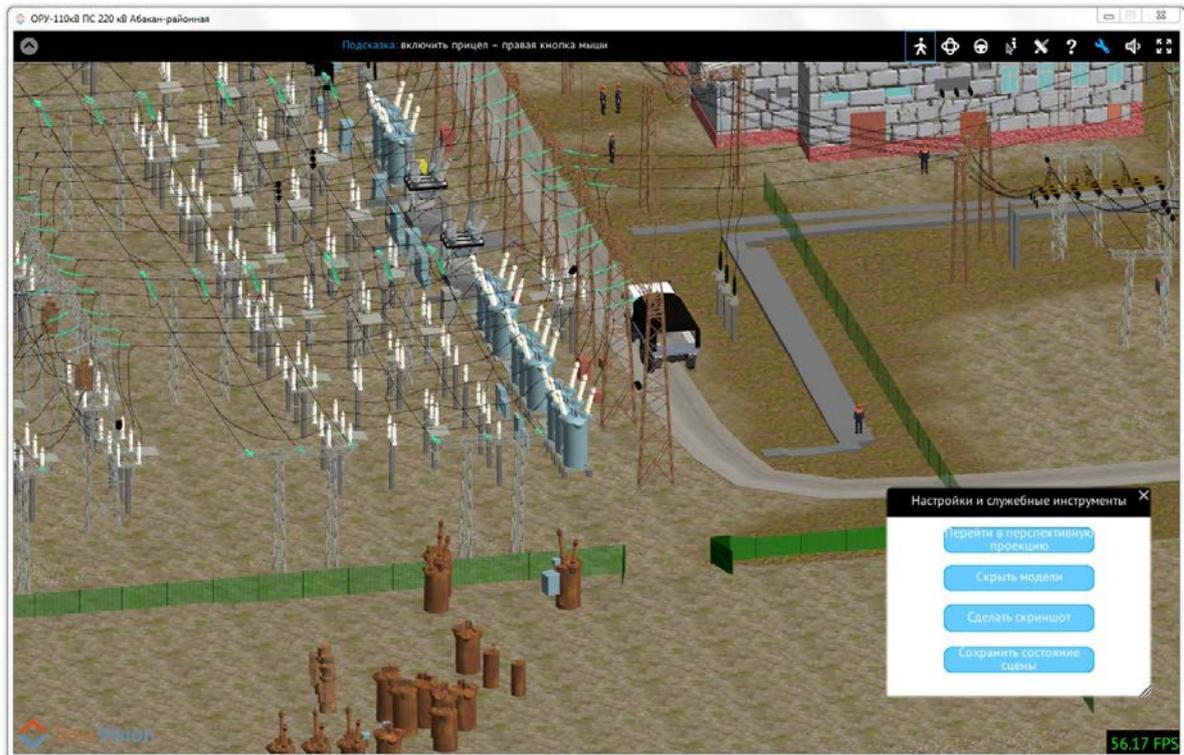


Рисунок 3.33 — Отображение модели в ортографической проекции (без перспективных искажений)

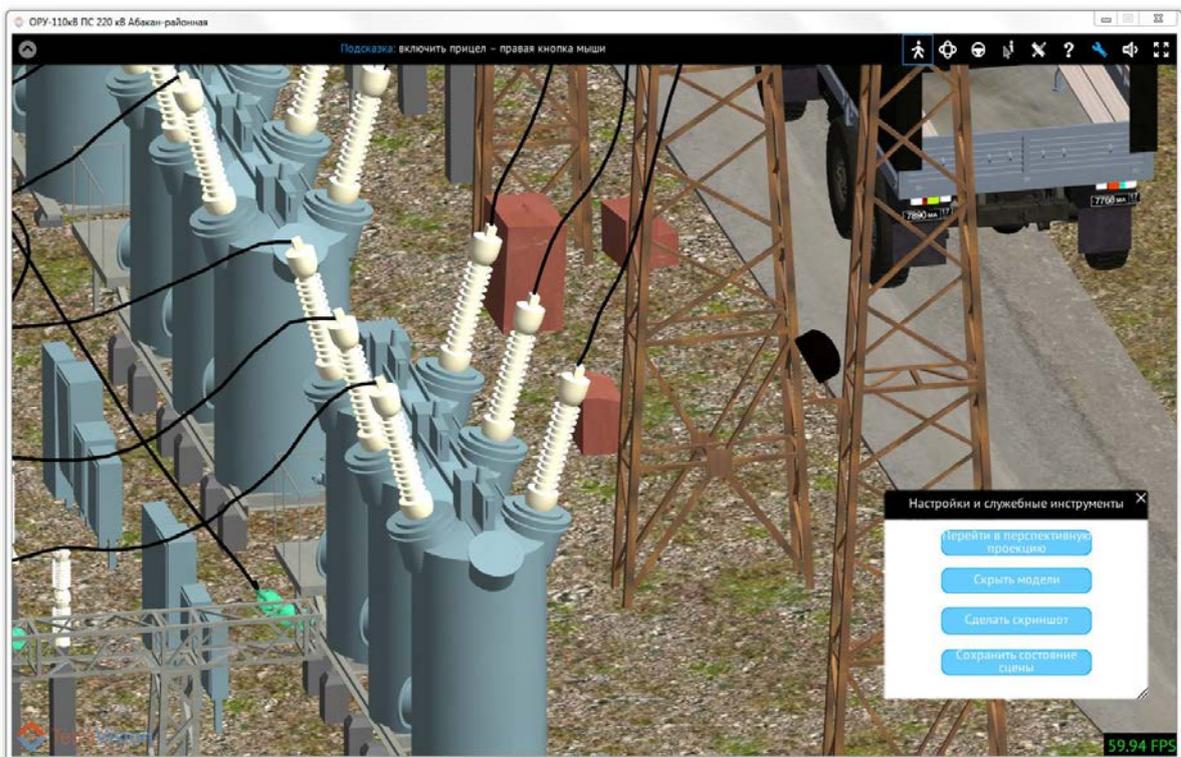


Рисунок 3.34 — «Зум» в ортографической проекции (изменение области, отображаемой на экране)

Поскольку ортографическая проекция предназначена, прежде всего, для построения чертежей, цвет фона в ней сделан белым, а тени отключены.

В ортографической проекции можно управлять толщиной видимого слоя модели. В том числе, можно выделить узкий видимый слой, что удобно для построения чертежей, рисунки 3.35-3.37.

Толщина слоя определяется положением передней и задней плоскостей отсечения.

Положение передней плоскости отсечения привязано к положению оператора, и меняется при перемещении оператора вперед (**w**) и назад (**s**).

Положением задней плоскости отсечения можно управлять. По умолчанию, она расположена очень далеко. Чтобы изменить ее положение, нужно вращать колесико мыши с зажатой клавишей **CTRL**. Чтобы замедлить перемещение задней плоскости (для точной настройки толщины выделяемого слоя), нужно дополнительно зажать клавишу **ALT**.



Рисунок 3.35 — Выделение видимого слоя 3D-модели, взгляд направлен под наклоном к поверхности земли



Рисунок 3.36 — Выделение видимого слоя модели, взгляд направлен параллельно поверхности земли

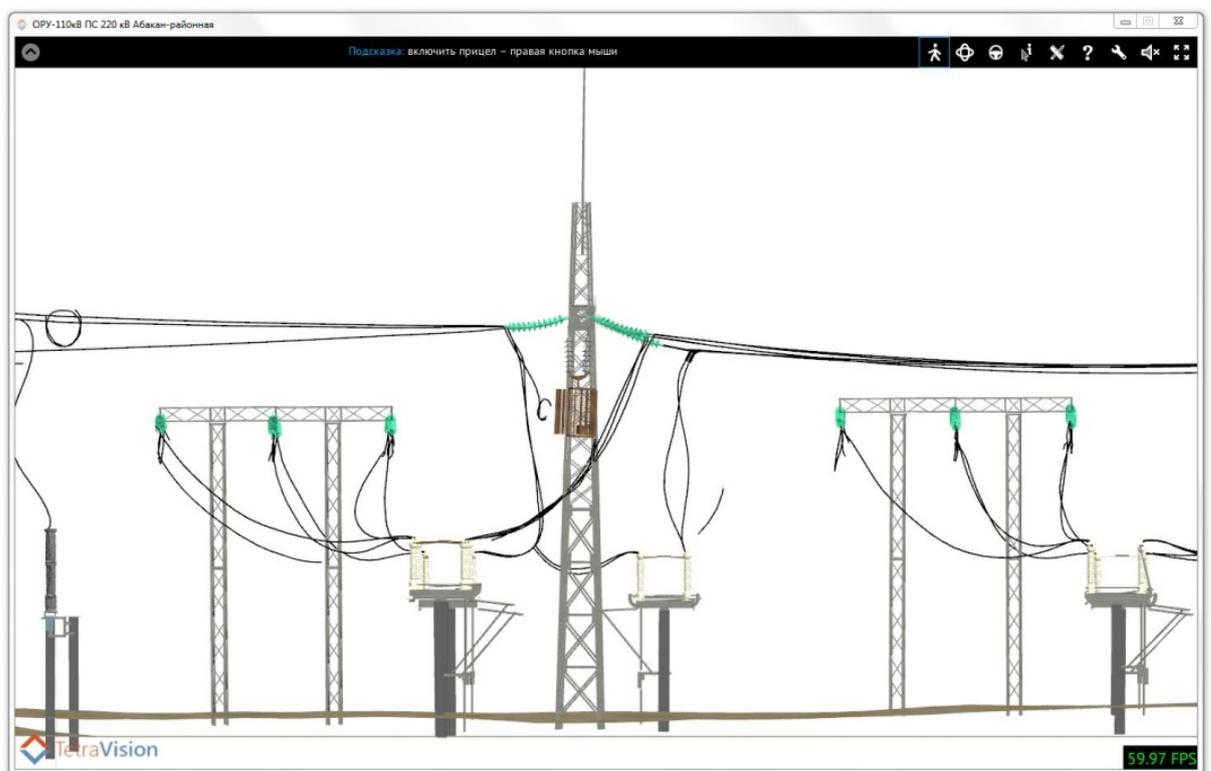


Рисунок 3.37 — Выделение видимого слоя модели, «зум».

В ортографической проекции, могут быть видны части конструкций, расположенные ниже поверхности земли.

Кнопка «Скрыть модели» / «Показать модели» позволяет включать и выключать видимость набора моделей транспортных средств и людей в сцене.

Кнопка «Сделать скриншот» позволяет сделать скриншот (т.е. снимок экрана) текущего вида окна приложения. Скриншоты сохраняются в папку по умолчанию. Для сохранения скриншота можно также использовать клавишу F10. При сохранении скриншота, в верхней части экрана появляется надпись с номером сохраненного скриншота, эта надпись пропадает через 3 сек. На самом скриншоте открытые окна интерфейса и всплывающая надпись с номером сохраненного скриншота не отображаются.

Кнопка «Сохранить состояние сцены» позволяет сохранить информацию о состоянии сцены (набор настроек, расположение движимых объектов и линеек) на компьютер пользователя. Файл с информацией о состоянии сцены сохраняется в папку по умолчанию, и называется «scene.txt». В дальнейшем, при запуске приложения, проверяется наличие файла scene.txt в указанной папке, и при его наличии – запускается сохраненное в нем состояние сцены.

Поддержано сохранение только одного состояния сцены. При новом нажатии на кнопку файл scene.txt перезаписывается. Если требуется сохранить несколько состояний, это можно сделать вручную (например, переместив файл в другую папку, или вручную изменив его название).

Звук. Кнопка включения/выключения звука позволяет включать и отключать звуковое сопровождение. Звуковое сопровождение заключается в звуковом оповещении при попадании в зону безопасности оператора, рабочих или машин. По умолчанию, звук включен.

Полноэкранный режим. Кнопка включения / выключения полноэкранный режима позволяет в любой момент переходить из оконного режима в полноэкранный и обратно.

Создание данного приложения с простым графическим интерфейсом пользователя заняло около 30 рабочих дней, включая разработку интерфейса «с нуля» и выполнение многих итеративных доработок и улучшений по пожеланиям заказчика.

Приложение разрабатывалось для установки на компьютерах с характеристиками не ниже: Windows 7 и выше, 32-битная (для низкополигональных и/или небольших 3D-моделей объемом менее 2 Гб), 64-битная (для 3D-моделей объемом более 2 Гб), процессор Intel Core i5, оперативная память 4 Гб, видеоадаптер встроенный Intel HD Graphics 5500 или аналогичный, жесткий диск 500 Гб.

Приложение не требует никакой поддержки со стороны дорогостоящих САПР-приложений. Приложение имеет простой и интуитивный интерфейс, и любой инженер в состоянии работать с 3D-моделью после ознакомления с инструкцией. Это важные преимущества игрового программного обеспечения.

Модель может быть визуализирована как в моно, так и в стерео режиме; стерео режим значительно увеличивает степень погружения и предназначается в основном для тренировочных задач и игрового обучения.

3.2.3 Применение интерактивной 3D-модели действующего технического объекта

Разработаны три варианта (сценария) использования приложения: ознакомление с объектом, планирование эксплуатации и ремонтных работ, организация обучения и тренировок оперативного персонала.

Для ознакомления с объектом, оператор может «перемещаться» по территории открытого распределительного устройства (ОРУ), получая на экране тот же вид, который может увидеть специалист при реальном осмотре электроустановки. Однако в отличие от реального осмотра, 3D-модель позволяет произвольно приближать и удалять вид, меняя сектор осмотра.

Кроме этого имеется возможность наблюдать ОРУ в режиме «полета», получая изображение вида сверху на различной высоте, выделяя ярусы.

Предусмотрена и возможность перемещения техники и персонала по территории ОРУ. Модель сопоставляет положение в пространстве техники и персонала с положением зон безопасности. Когда объект пересекает зону допустимой электробезопасности, выдается предупреждение в виде мигания экрана, всплывающего текста и/или звуковых сигналов. Кроме этого, имеется окно с атрибутивной информацией об элементах сцены, появляющееся при нажатии кнопки мыши, рисунок 3.38.



Рисунок 3.38 — Вывод атрибутивной информации о выбранном элементе виртуальной 3D-модели подстанции

Второй вариант использования разработанного приложения – это планирование ремонтных работ. Для этой цели используются следующие возможности 3D-модели:

- моделирование реальных ремонтных режимов электроустановки изменением положения разъединителей и заземляющих ножей, рисунок 3.39;
- отображение допустимых расстояний при приближении к незаземленным токоведущим частям электроустановки;

- определение зоны безопасного проведения работ и перемещения техники;
- определение достоверных (с точностью 5 см) расстояний между любыми объектами;
- определение и отслеживание кратчайшего расстояния между транспортным средством, механизмом и токоведущими частями при перемещении по виртуальному ОРУ, рисунок 3.40;
- формирование двухмерных чертежей с использованием ортогональной проекции, рисунок 3.41.

Например, в 3D-модели может быть визуализирован вывод в ремонт части электроустановки, рисунок 3.39. При этом в 3D-модели меняется положение разъединителей и заземляющих ножей, отключаются зоны безопасности для заземленных частей электроустановки, и таким образом наглядно визуализируются зоны безопасного проведения работ и перемещения техники.



Рисунок 3.39 — Секция шин ОРУ и выключатель выведены в ремонт.

Опасные зоны изображаются вдоль всех незаземленных частей электроустановки.

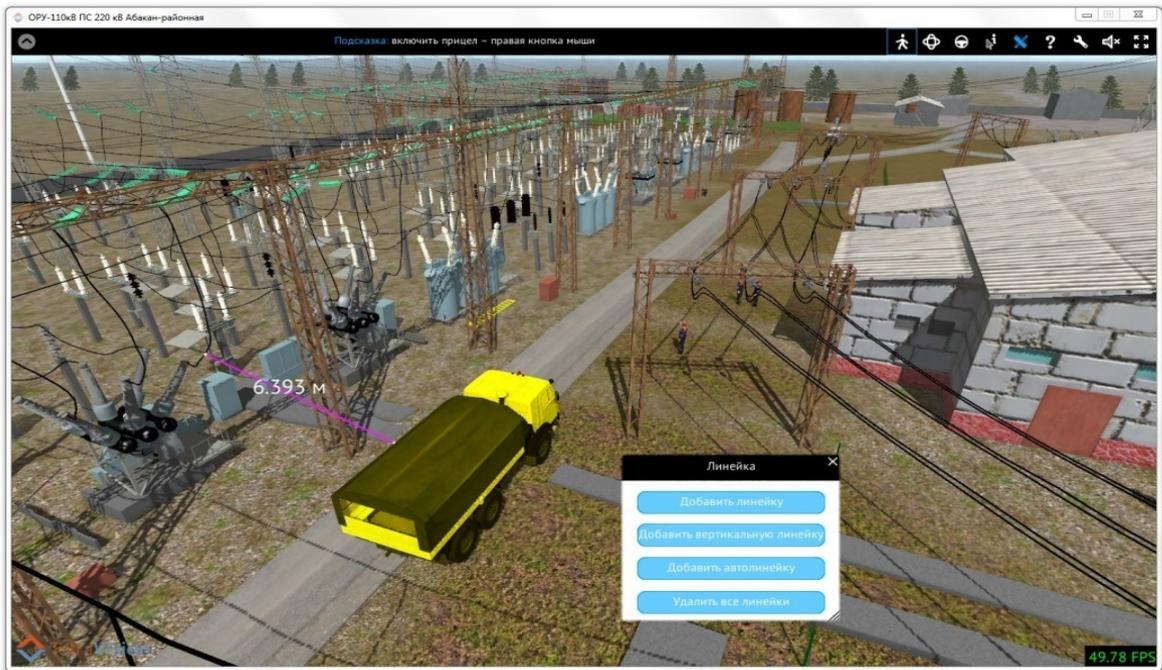


Рисунок 3.40 — Автоматическое вычисление кратчайшего расстояния от подвижного объекта до ближайшей незаземленной токоведущей части энергоустановки.



Рисунок 3.41 — Ортографическая проекция части 3D-модели для составления плана производства работ (ППР).

Третий вариант применения – организация обучения и тренировок оперативного персонала. Приложение позволяет формировать динамические сцены развития возможных аварийных ситуаций в соответствии с заданным сценарием и в зависимости от действий персонала, рисунки 3.42-3.43. Например, имеется возможность оценить действия оперативного персонала

при возгорании маслонаполненного оборудования, начиная от определения текущей ситуации, и до завершения тушения возгорания подразделением МЧС России, рисунки 3.44-3.45.

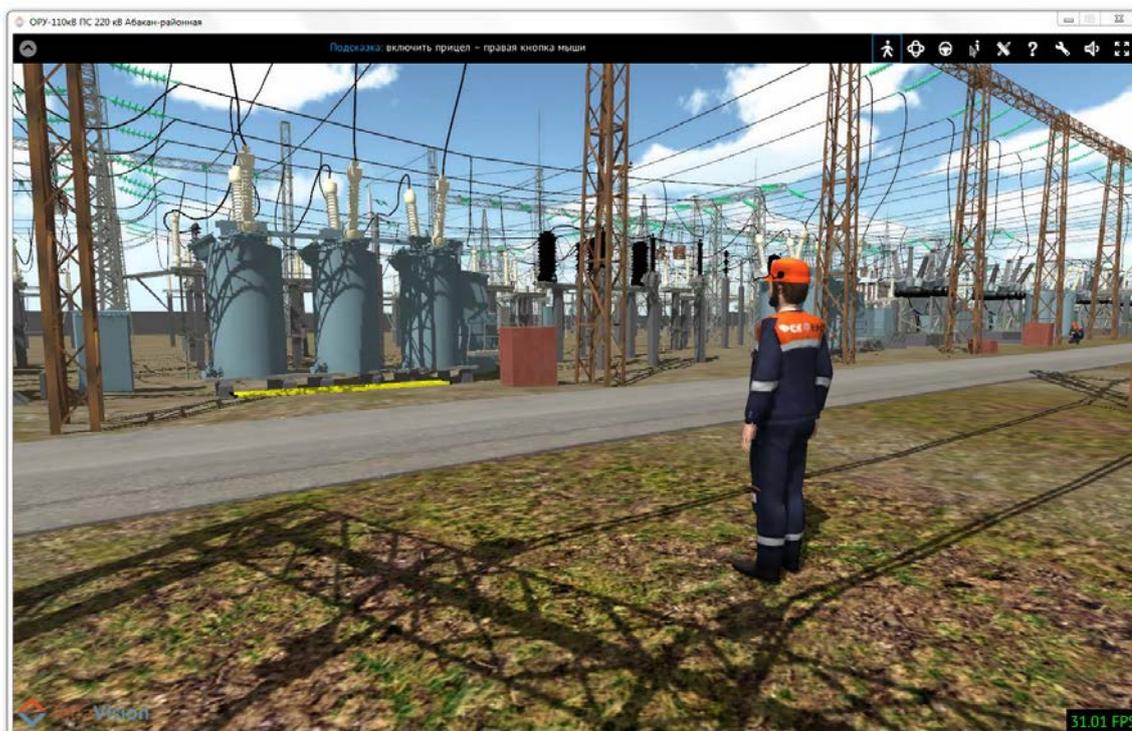


Рисунок 3.42 — Анимация действий рабочего, начальное положение

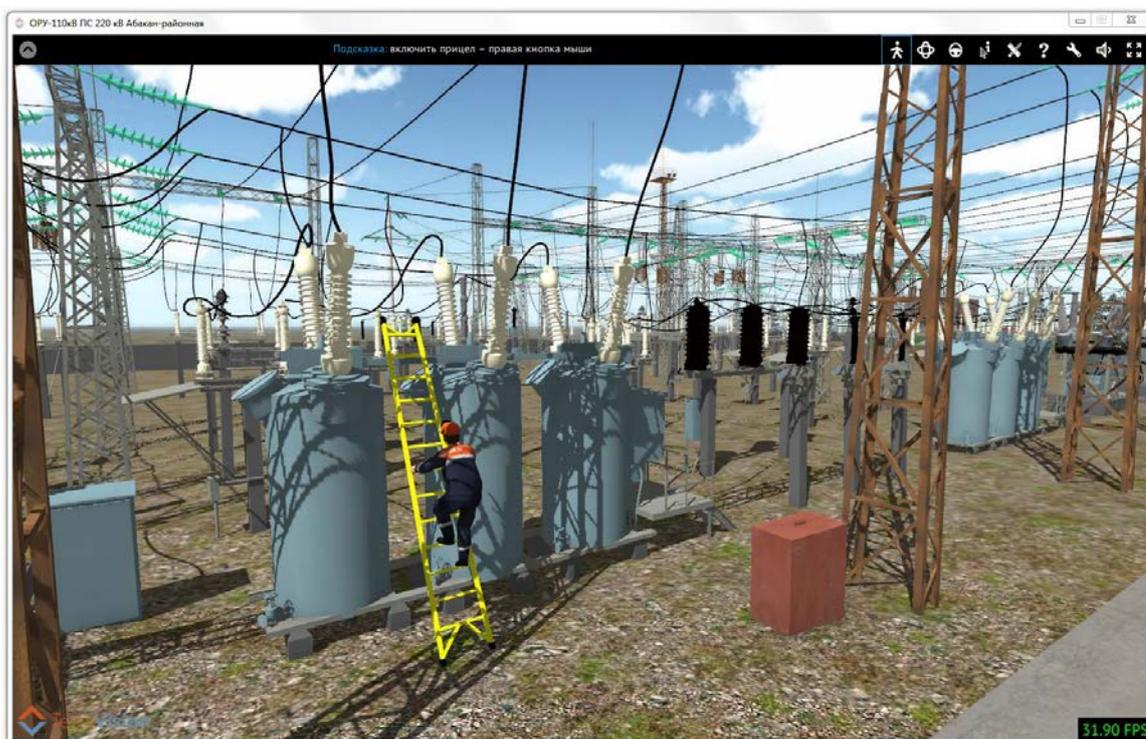


Рисунок 3.43 — Анимация действий рабочего, подъем по лестнице



Рисунок 3.44 — Анимация чрезвычайной ситуации (возгорание маслонаполненного оборудования)

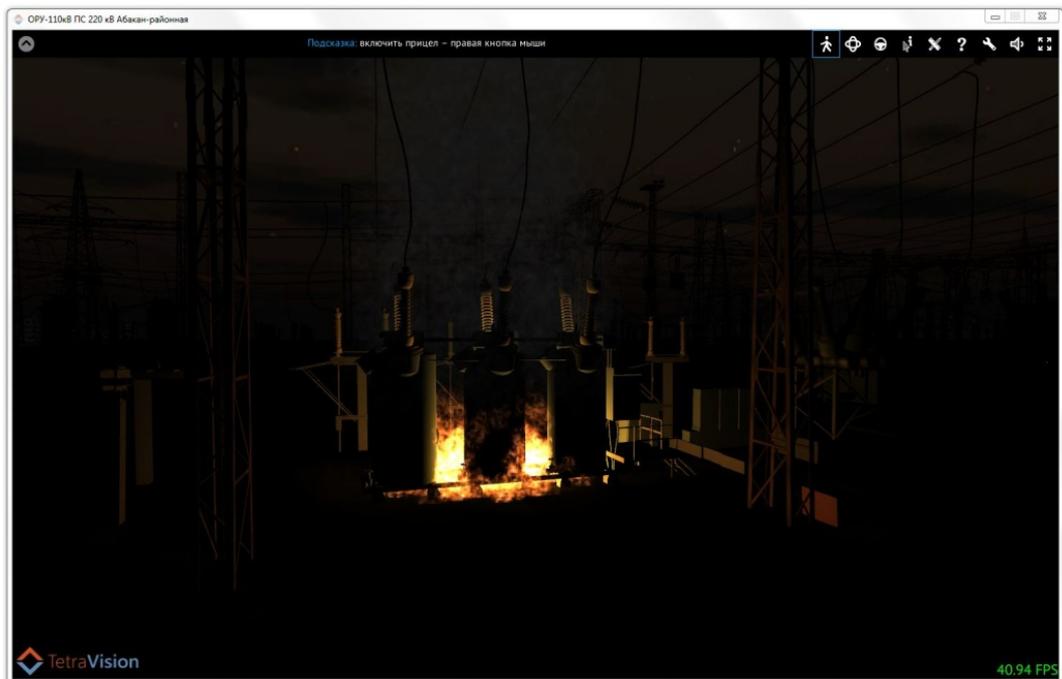


Рисунок 3.45 — Анимация чрезвычайной ситуации (возгорание маслонаполненного оборудования) в ночном режиме. При нажатии клавиши «n» (мнемоника – «night», ночь) включается ночной режим освещения. Повторное нажатие клавиши «n» возвращает дневной режим.

Использование программного комплекса позволило:

- сократить расходы на подготовку ремонтных работ;
- выявить особо сложные, в части организации ремонтных работ, участки электроустановки;
- оптимизировать последовательность производства этапов работ, перемещения техники и механизмов;
- создать совершенно новый метод обучения и тестирования оперативного персонала.

Специалисты предприятия, которое выступало заказчиком работ по созданию приложения, рассматривают планирование эксплуатации и ремонтных работ как наиболее многообещающее применение приложения. По их мнению, приложение имеет значительный, пока не полностью оцененный, потенциал развития. В будущем планируется дополнить приложение базами данных техники (габариты, радиус разворота, грузоподъемность, грузовые характеристики и т.д.). В перспективе возможна также интеграция приложения в систему АСУ ТП, создание системы мониторинга объекта, в том числе мониторинга местоположения персонала и техники при производстве работ на объекте в режиме реального времени.

3.3 Представление 3D-моделей на виртуальном глобусе

3.3.1 Виртуальный глобус: история развития и перспективы

Стремительное развитие виртуальных глобусов в начале 2000-х гг. было обусловлено тремя факторами: созданием графических процессоров для видеокарт, запуском коммерческих спутников с фотокамерами высокого разрешения, и радикальным ростом скорости сетей связи. Основные этапы развития виртуальных глобусов включали в себя: законченные приложения, программные библиотеки, браузерные версии, внедрение технологий процедурной генерации для повышения визуальной реалистичности поверхности при крупном масштабе просмотра.

Рассмотрим историю развития виртуальных глобусов – от первых прототипов до современного программного инструментария, позволяющего создать свой виртуальный глобус каждому желающему [Бобков, Леонов, 2017].

Введение. Виртуальный глобус – это мультимасштабная цифровая 3D-модель Земли, а также интерактивное программное обеспечение для синтеза изображения этой 3D-модели или ее фрагмента на экране монитора [Cozzi, Ring, 2011].

«Предком» виртуального глобуса является традиционный глобус, то есть сфера с нанесенным на нее изображением поверхности Земли, рисунок 3.46. Такие сферы создавались еще до нашей эры. В частности, по свидетельству Страбона, глобус был создан ок. 150 г. до н.э. Кратетом Малльским: *«...тот, кто желает ближе всего подойти к истинной форме земли с помощью искусственных моделей фигур, должен изобразить землю в виде шара, наподобие шара Кратета... необходим большой шар, для того чтобы... на нем ясно поместились соответствующие части обитаемого мира, а зрителям представилась привычная его картина... лучше всего, конечно, если возможно, построить шар соответствующего размера. И пусть он будет не меньше 10 футов в диаметре»* [Страбон, II, 5, 10]. Старейшие из сохранившихся до настоящего времени глобусов относятся к кон. XV – нач. XVI вв.: это глобус Бехайма (1492 г.), «глобус из страусинового яйца» (ок. 1504 г.), глобус Ханта-Ленокса (ок. 1503-1507 гг.), Ягеллонский глобус (ок. 1510 г.) и др.



Рисунок 3.46 — Глобус Мартина Бехайма – “Erdapfel” («Земное яблоко»).

Фото – Vitold Muratov, 2009.

По сравнению с плоскими картами, традиционные глобусы обладают как преимуществами, так и недостатками.

Основные недостатки традиционных глобусов, по существу, ясны уже из описания Страбона: это их мелкий масштаб и большой физический размер; к ним следует добавить также неудобство измерений. В то же время, на глобусе отсутствуют картографические искажения, свойственные мелкомасштабным картам, и он значительно более нагляден и удобен для визуального восприятия Земли в целом.

В компьютерную эпоху в дополнение к традиционным глобусам (которые по-прежнему применяются, например, в учебном процессе), возникли две новые технологии: интерактивные глобусы на основе сферических проекционных экранов, и виртуальные (цифровые) глобусы.

Глобусы на основе сферических экранов развиваются, по меньшей мере, с начала 2000-х гг. При этом изображение, предварительно искаженное соответствующим образом, проецируется на сферический экран через линзу типа «рыбий глаз». Это позволяет визуализировать на сферическом экране не только изображение поверхности Земли, но и процессы, происходящие на Земле и вблизи ее поверхности (например, атмосферные и гидросферные явления, движение литосферных плит, изменения магнитного поля и т.п.). Изображение на сферическом экране можно легко менять, что делает такие глобусы отличным учебным пособием в школах [Рыбкина и др., 2015], рисунок 3.47. В то же время, из-за физических ограничений на размер сферического экрана (который на практике не превышает нескольких метров), интерактивные глобусы на основе сферического экрана обладают теми же недостатками, что и традиционные «статичные» глобусы.



Рисунок 3.47 — Интерактивный глобус на основе сферического проекционного экрана. Фото из архива ГЦ РАН, 2011 г.

Виртуальный глобус, в отличие от традиционных глобусов и сферических экранов, не имеет ограничений, связанных с физическим размером экрана. Виртуальный глобус – это цифровая 3D-модель, которая хранится в памяти компьютера; любой фрагмент этой модели может быть отображен на плоском экране компьютерного монитора или другого персонального электронного устройства (планшетного компьютера, смартфона и т.п.) в любом требуемом масштабе. Выполнение измерений на виртуальном глобусе намного удобнее, чем на традиционном глобусе, т.к. соответствующие функции могут быть реализованы непосредственно в графическом интерфейсе пользователя, рисунок 3.48. Благодаря этим, а также другим преимуществам (таким, как широкие возможности визуализации внутреннего устройства Земли и околоземного пространства), виртуальный глобус является перспективной технологией, постепенно вытесняющей традиционные глобусы.

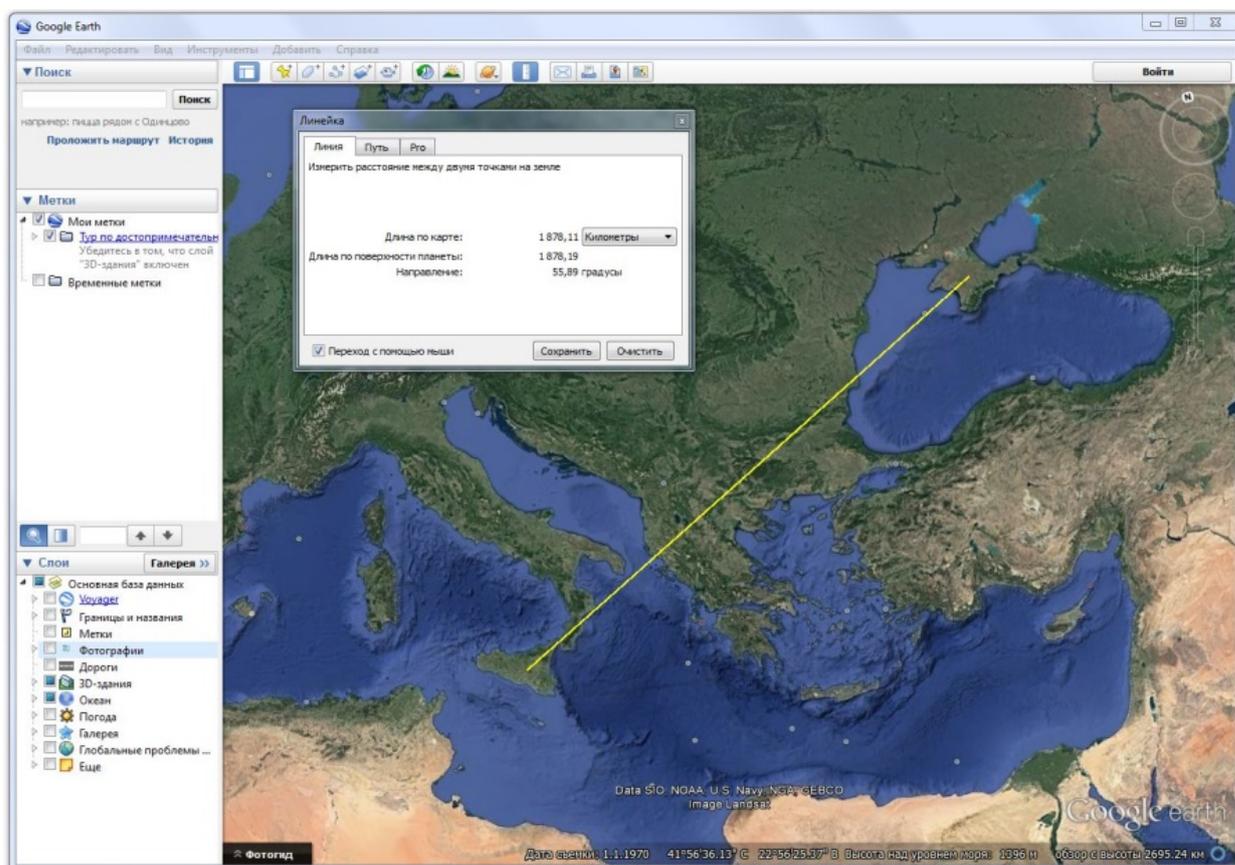


Рисунок 3.48 — Измерение расстояния на виртуальном глобусе Google Earth

Предыстория развития виртуальных глобусов. В 1990-е гг. компьютеры были еще недостаточно мощными для интерактивной визуализации сложных 3D-моделей. В 1992 г. был опубликован научно-фантастический роман «Лавина» Нила Стивенсона, в котором он описал универсальный интерфейс для доступа к данным, названный им «Земля». Этот интерфейс позволял просматривать данные, связанные с любой точкой нашей планеты, в том числе трансляцию со спутников в реальном времени [Стивенсон, 2003]. Интересно, что этот роман вдохновил Дэна Гордона, одного из создателей виртуального глобуса Google Earth (см. напр. http://www.liquisearch.com/google_earth/influences). Прототипы виртуальных глобусов можно встретить во многих компьютерных играх начала 1990-х гг., рисунок 3.49.



Рисунок 3.49 — Виртуальный глобус в игре X-COM: UFO Defense, 1994 г.

В конце 1990-х гг. были созданы и выпущены на мировой рынок интерактивные энциклопедии Encarta Virtual Globe (Microsoft, 1998 г.) и 3D World Atlas (Cosmi Corporation, 1999 г.), которые позволили просматривать цифровой 3D-глобус в мелком масштабе с разными покрытиями, рисунки

3.50-3.51. Это были мультимедийные приложения, где глобус сочетался с разнообразной энциклопедической информацией о странах мира. Разрешение текстур было невысоким, поэтому они помещались на обычные CD-диски. Однако для полноценного виртуального глобуса по-прежнему не хватало производительности компьютеров и данных более крупного масштаба.



Рисунок 3.50 — Виртуальный глобус Encarta Virtual Globe, 1998 г.

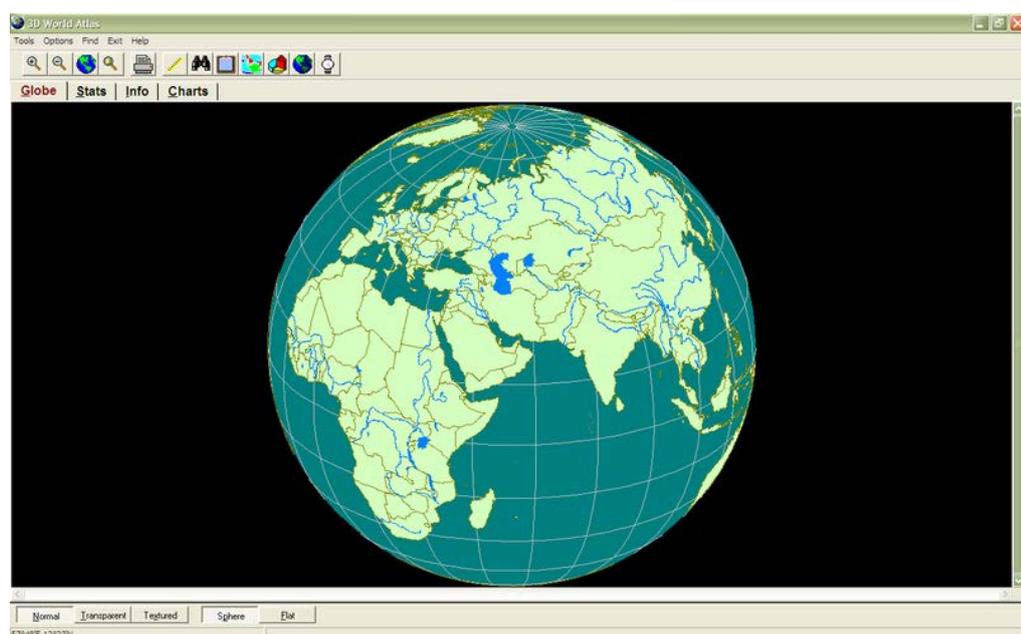


Рисунок 3.51 — Виртуальный глобус 3D World Atlas, 1999 г.

Интересно, что 31 января 1998 г. вице-президент США Альберт Гор произнес речь «Цифровая Земля: понимание нашей планеты в XXI веке», в которой он предложил создать «Цифровую Землю» — приложение, которое должно включать все увеличивающееся количество геоданных, быть подсоединено к базам данных и знаний всего мира и обеспечить лучшее описание и понимание окружающего мира и человеческой деятельности [Gore, 1998].

На рубеже тысячелетий произошел рывок в развитии нескольких важных технологий, которые открыли дорогу широкому развитию и внедрению виртуальных глобусов [Бобков, 2013а]:

1) Появились видеокарты, оснащенные графическими процессорами. Например, компанией Nvidia в качестве «первого графического процессора» широко рекламировался процессор GeForce 256, официальный релиз которого состоялся 11 октября 1999 г. Графический процессор в видеокартах позволил разгрузить центральный процессор и ускорить работу с полигональными 3D-моделями.

2) Были запущены коммерческие спутники с высоким пространственным разрешением: ICONOS (0,82 м на пиксель при панхроматической съемке, 1999 г.) и QuickBird (0,61 м на пиксель при панхроматической съемке, 2001 г.). Это позволило получить спутниковое покрытие практически всей территории Земли с высокой детализацией. В 2000 г. была выполнена радарная интерферометрическая съемка поверхности земного шара, в результате чего создана общедоступная цифровая модель рельефа 85% территории Земли с пространственным разрешением 90 м на пиксель (NASA SRTM, 2003-2005 гг.).

3) Радикально возросла скорость передачи данных в сетях связи. Канальная скорость в коммерческих волоконно-оптических системах связи достигла 10 Гбит/с в 1995 г., и 40 Гбит/с – в 2002 г. [Agrawal, 2005, С. 17]. При этом уже к 2000 г. по одному оптическому волокну стало возможно передавать до ста независимых каналов на разных длинах волн благодаря

технологии спектрального уплотнения (DWDM). Развитие высокоскоростных сетей связи позволило пользователям получать спутниковые данные, необходимые для виртуального глобуса, в реальном времени с серверов в интернете.

Эти новые технологии привели к созданию виртуальных глобусов в привычном нам понимании. В развитии виртуальных глобусов с 2001 г. по настоящее время можно выделить несколько основных этапов: 1) виртуальные глобусы в виде законченных приложений, 2) программные библиотеки для создания виртуальных глобусов, а также виртуальные глобусы для браузера, 3) развитие технологий процедурной генерации 2D/3D-объектов и их использование в программном инструментарии виртуальных глобусов.

Виртуальные глобусы в виде законченных приложений. Первое поколение виртуальных глобусов было ориентировано преимущественно на просмотр спутниковых снимков. В 2001 г. свой виртуальный глобус начала разрабатывать компания Keyhole. Позже она была куплена компанией Google, а созданный ей виртуальный глобус выпущен на мировой рынок в 2005 г. под названием Google Earth, рисунок 3.52. Примерно в это же время свои виртуальные глобусы выпустили NASA (NASA World Wind, 2004 г.), рисунок 3.53, и Microsoft (Microsoft Virtual Earth, 2006 г.).

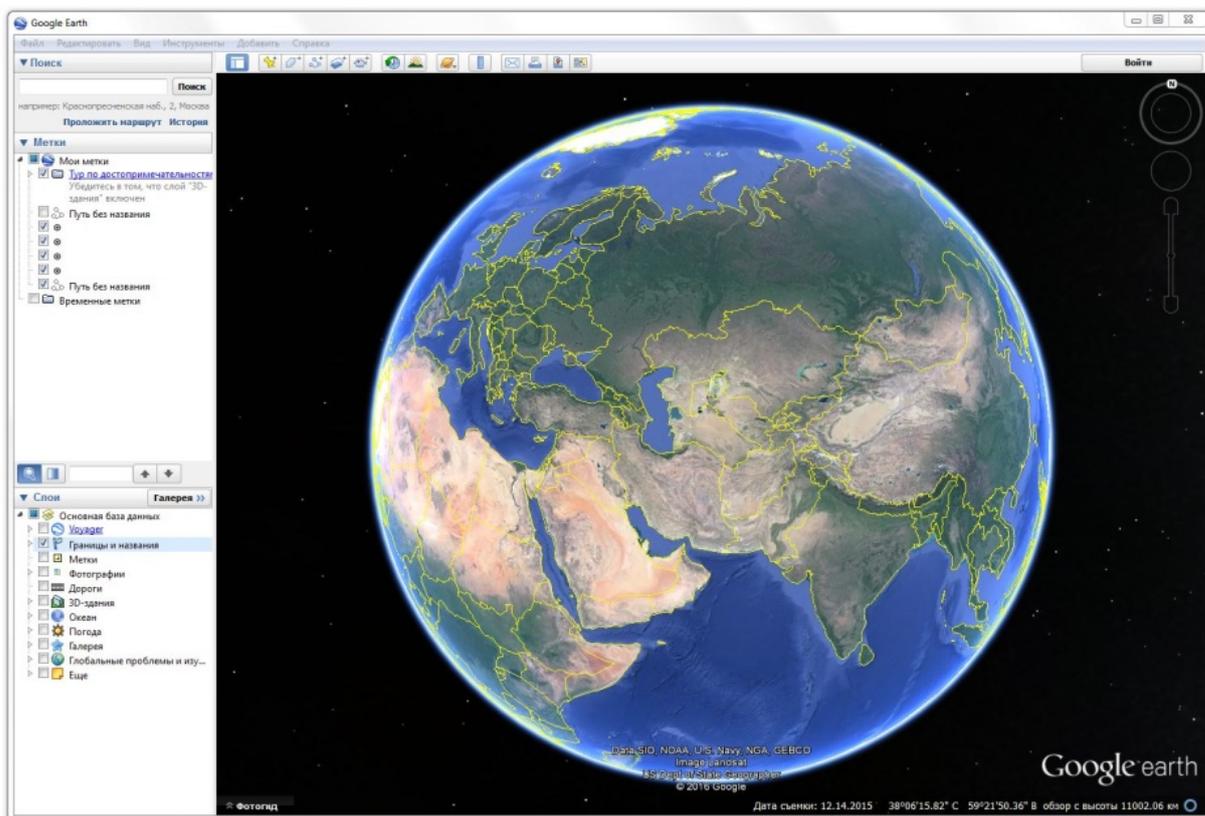


Рисунок 3.52 — Один из наиболее популярных виртуальных глобусов:
Google Earth.

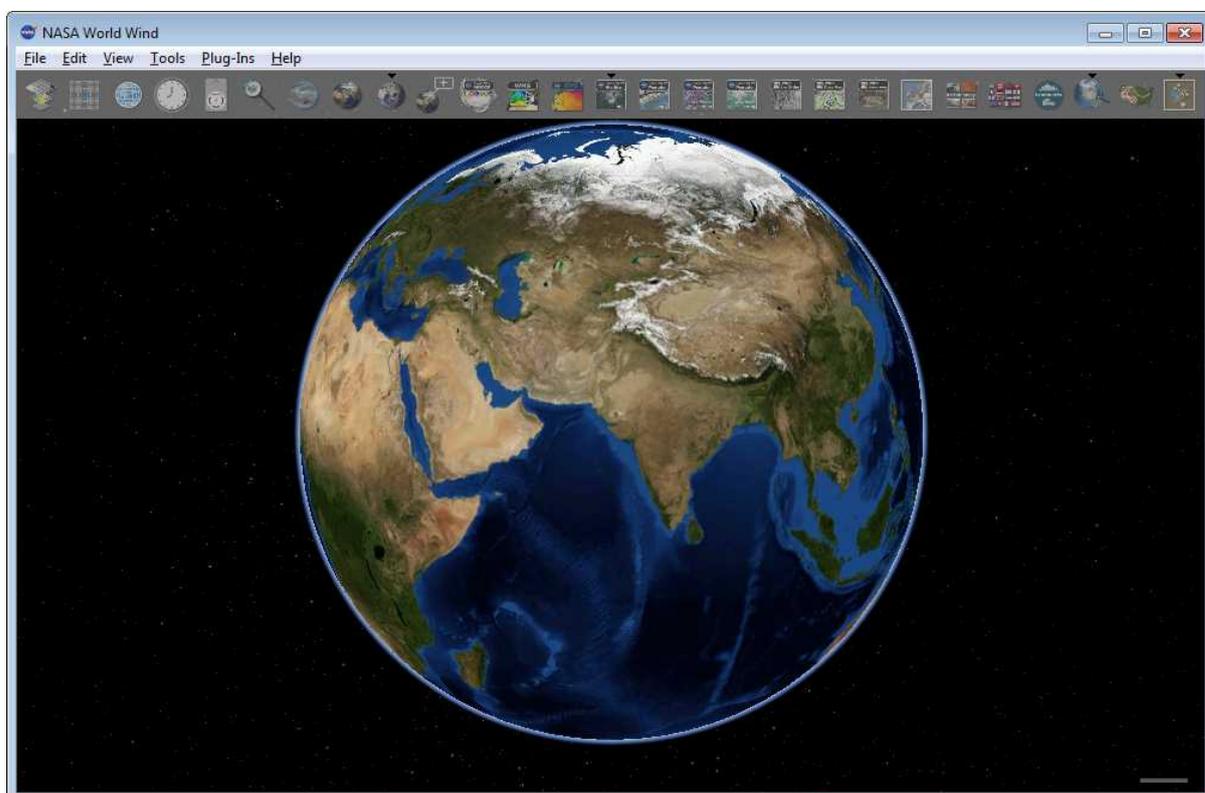


Рисунок 3.53 — Виртуальный глобус NASA World Wind 1.4.0.

Особенностью всех этих программных продуктов было то, что они обладали узким набором функциональных возможностей. По существу, они предлагали пользователю лишь просмотр спутниковых снимков, размещенных на интернет-серверах производителей. Их было нельзя расширять, усовершенствовать, добавлять свои типы данных и интегрировать с другими приложениями. По-видимому, это и привело в итоге к закрытию проектов NASA World Wind и Microsoft Virtual Earth.

До настоящего времени существует лишь виртуальный глобус Google Earth, в основном благодаря возможности свободного обмена геоданными с другими программными продуктами с использованием открытого формата KML (Keyhole Markup Language). В то же время, исходный код Google Earth закрыт, и у него нет программного интерфейса (API), что ограничивает его развитие. API был у браузерной версии Google Earth plugin, поддержка которой прекращена в 2014 г.

Как дополнительная функция, отображение данных на виртуальном глобусе было поддержано в некоторых традиционных ГИС. Например, в девятой версии ArcGIS (2004 г.) один из дополнительных модулей – ArcGIS 3D Analyst – включал в себя приложение ArcGlobe, обеспечивающее отображение растровых и векторных данных на мультимасштабном виртуальном глобусе. Это приложение и сегодня входит в состав ArcGIS 3D Analyst, практически с той же базовой функциональностью.

Отметим, что простые виртуальные глобусы в виде составной части законченных приложений создавались и отечественными разработчиками [Михайлюк, Торгашев, 2012].

Программные библиотеки для создания виртуальных глобусов. Опыт использования виртуальных глобусов достаточно быстро показал, что спектр их возможных применений очень широк, и реализовать все возможные функции в рамках одного законченного приложения практически невозможно. Поэтому начали появляться программные библиотеки для самостоятельного создания виртуальных глобусов и встраивания их в

различные приложения. Были созданы десятки таких библиотек, среди которых можно выделить NASA World Wind Java SDK (2007 г.) и osgEarth (2008 г.).

Эти библиотеки позволяют внедрять возможности виртуального глобуса в другие приложения. Они «берут на себя» генерацию глобуса с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяя пользователям самостоятельно подключать любые типы и источники данных, а также разрабатывать собственные приложения для анализа данных на основе глобуса.

Например, одна из наиболее популярных таких библиотек – osgEarth (<http://osgearth.org/>). Это инструментарий с открытым исходным кодом для рендеринга рельефа и данных на рельефе виртуального глобуса, написанный на C++ и выпущенный под лицензией LGPL. osgEarth основан на OpenGL и является надстройкой над графическим инструментарием OpenSceneGraph. Соответственно, osgEarth работает на любых операционных системах, которые поддерживают OpenGL, включая мобильные iOS и Android. Его можно использовать для разработки собственных приложений, либо для интеграции виртуального глобуса в существующие приложения.

Например, нами был разработан ряд приложений с использованием виртуального глобуса на основе osgEarth для визуализации рельефа и расположенных на нем объектов [Леонов и др., 2012], а также визуализации подземных данных [Бобков и др., 2012a], [Бобков и др., 2012б] и визуализации данных в околоземном пространстве [Бобков и др., 2013]. Эти приложения будут описаны ниже в данной главе.

Одно из основных отличий osgEarth от NASA World Wind Java SDK заключается в том, что исходные растровые данные для построения рельефа не обязательно заранее обрабатывать. osgEarth может работать с «сырыми» данными и генерировать рельеф динамически во время работы приложения. В то же время, предобработка данных может ускорить этот процесс.

Генерируемый рельеф автоматически кэшируется, что позволяет ускорить работу приложения при последующих запусках.

Основные возможности osgEarth такие же, как и в WW Java SDK: загрузка изображений поверхности Земли и карт высот из разных интернет-источников по протоколам WMS, WCS, TMS; использование локальных данных; чтение векторных форматов файлов (KML, shape file); визуализация векторных данных (точки, линии, полигоны); визуализация 3D-моделей и аннотаций. Добавить графический интерфейс пользователя (GUI) можно либо с помощью фреймворка Qt, либо с помощью встроенной библиотеки виджетов.

Конфигурировать глобус osgEarth можно либо в коде на C++, либо с помощью специального файла в формате XML. В этом файле указываются пути к слоям изображений, карт высот, пути к файлам с векторными данными. Можно задавать стили в формате CSS для векторных данных в зависимости от их атрибутов. Также для этих целей можно использовать JavaScript.

Как и все современные виртуальные глобусы, osgEarth может разбивать большие массивы векторных данных на тайлы с уровнями детализации (LoD – Level of Details) и подгружать их при приближении к поверхности глобуса. Авторы osgEarth разработали протокол Tile Feature Service (TFS) для быстрой подгрузки таких данных в osgEarth.

Отметим, что в 2011 г. вышла монография «3D Engine Design for Virtual Globes» [Cozzi, Ring, 2011], полностью посвященная вопросам разработки приложений с использованием виртуальных глобусов. В ней рассматриваются основные вопросы и задачи, которые возникают при разработке глобусов: системы координат, математика эллипсоида, проблема точности и дрожания (jittering), рендеринг векторных данных на глобусе, рендеринг рельефа. Также в 2011 г. вышел специальный выпуск журнала Computers & Geosciences — «Virtual Globes in Science», полностью посвященный виртуальным глобусам [Virtual..., 2011].

Виртуальные глобусы для браузера. Примерно в то же время, что и программные библиотеки для разработки виртуальных глобусов, начали появляться виртуальные глобусы, работающие в браузере. Одним из первых стал Google Earth plugin (2008 г.), реализованный в виде плагина для браузера. В отличие от своего «старшего брата» Google Earth он обладал важной особенностью: возможностью управления данными на глобусе с помощью скриптов на языке Javascript. Это позволяло пользователям, например, создавать в браузере собственный графический интерфейс для управления отображением данных. Однако NPAPI, технология создания плагинов для браузеров, обладала рядом недостатков, и браузеры начали отказываться от нее. В 2014 г. проект Google Earth plugin был закрыт.

С начала 2010-х гг., начала внедряться новая технология 3D-визуализации в браузерах – WebGL. Следует отметить, что реализация веб-приложений, обеспечивающих интерактивную демонстрацию 3D-моделей, долгие годы сдерживалась отсутствием единого стандарта (технологии) представления 3D-графики для браузеров. В 2011 г. была представлена спецификация WebGL, которая в течение нескольких лет была поддержана почти всеми популярными браузерами: Mozilla Firefox, Google Chrome, Safari, Opera. В ноябре 2013 г. поддержка WebGL была реализована и в наиболее массовом браузере Internet Explorer. Официальный релиз Internet Explorer 11 с поддержкой WebGL вышел 7 ноября 2013 г., таким образом, WebGL стал де-факто стандартом представления 3D-графики в Интернете без использования плагинов. Соответственно, появилось несколько новых программных библиотек для создания виртуальных глобусов, основанных на WebGL, самой популярной из которых на сегодняшний день является Cesium (2012 г.), рисунок 3.54.

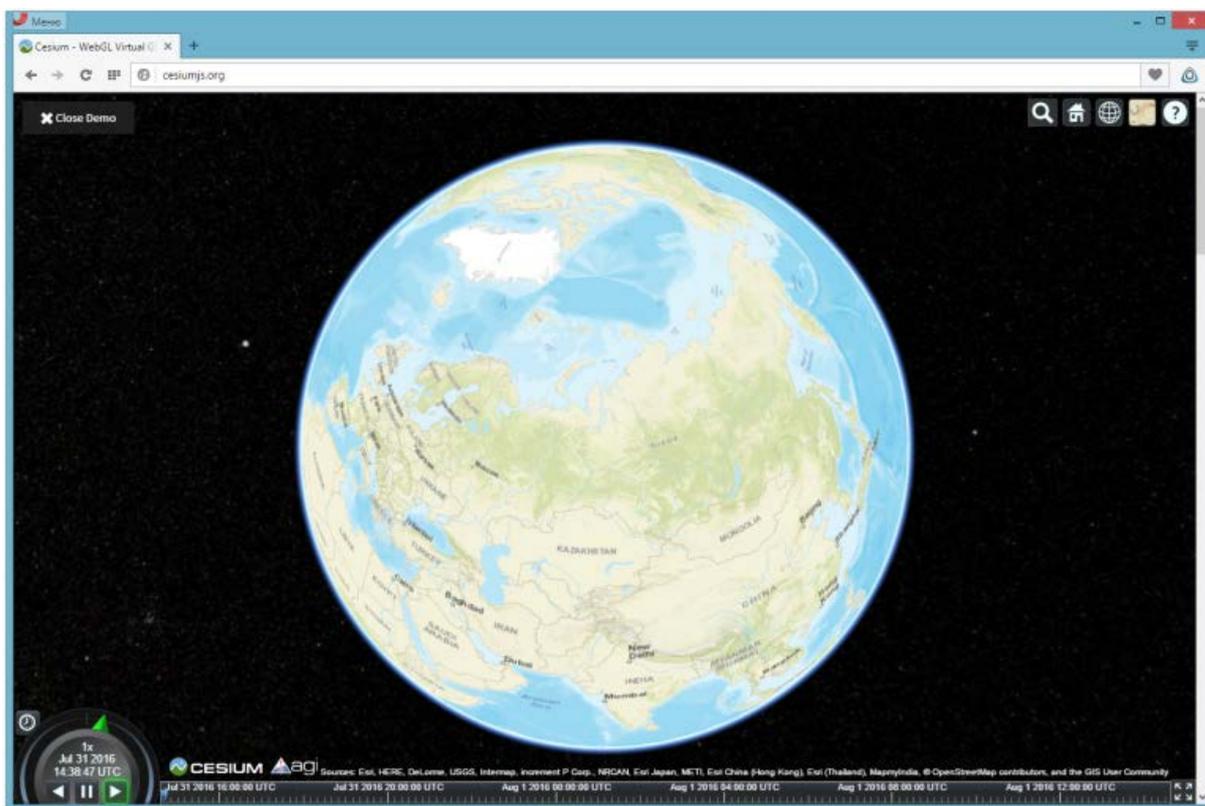


Рисунок 3.54 — Демо-версия виртуального глобуса Cesium с покрытием ESRI World Street Map.

Программный инструментарий Cesium позволяет использовать различные источники данных (WMS, TMS, WMTS, Bing Maps, Mapbox, Google Earth Enterprise, OpenStreetMap, ArcGIS MapServer), отображать на глобусе различные векторные данные (подписи, метки, линии, полигоны и другие), читать форматы векторных данных KML, GeoJSON, TopoJSON, отображать 3D-модели, атмосферу, солнце, луну, звезды. Есть своя библиотека виджетов для управления глобусом и данными, модули для проведения математических расчетов, поддержка визуализации теней.

Процедурная генерация объектов на виртуальных глобусах. Детализация спутниковой фотосъемки поверхности Земли, используемой в современных виртуальных глобусах, не превышает 0,5 м на пиксель, а детализация цифровой модели рельефа – на 1-2 порядка меньше (например, NASA SRTM – 30 м/пиксель для территории Северной Америки, и 90 м/пиксель для других территорий). Дальнейшее увеличение детализации

поверхности Земли на виртуальном глобусе возможно за счет применения данных авиационного ДЗЗ (аэрофотосъемки, воздушного лазерного сканирования – LiDAR) или наземного лазерного сканирования для отдельных, представляющих наибольший интерес участков (например, центров крупных городов). Однако высокая стоимость этих технологий (по сравнению с космическим ДЗЗ) существенно ограничивает возможности получения таких данных. Кроме того, реалистичное представление поверхности Земли в крупном масштабе невозможно без размещения на цифровой модели подстилающего рельефа цифровых 3D-моделей объектов – зданий и сооружений, транспортной инфраструктуры, растительности и др.

Для создания метрически точных крупномасштабных цифровых моделей рельефа и 3D-моделей реальных объектов необходимо применение дорогостоящих методов лазерного сканирования, фотограмметрии, ручного моделирования по чертежам и фотографиям. Для точного расположения 3D-моделей на местности применяются методы привязки по спутниковым снимкам, методы наземной геодезии. Таким образом, внедрение на поверхность виртуального глобуса метрически точных 3D-моделей реальных объектов возможно, но имеет существенные финансовые и технические ограничения.

К счастью для разработчиков, требования к точности соответствия виртуального глобуса и реальной территории в практических применениях существенно различаются для различных участков и разных типов объектов. Поэтому оказывается возможным разделить задачи метрической точности и детализации элементов сцены. Далеко не все объекты, расположенные на местности, требуется моделировать и размещать метрически точно; многие элементы необходимы лишь для создания эффекта визуальной реалистичности и могут быть смоделированы с той или иной степенью условности. Некоторые из таких объектов должны быть точно размещены на подстилающем рельефе (здания, дорожная сеть), для других не требуется даже точность размещения (растительность).

Для создания условных 3D-моделей объектов с высоким уровнем детализации могут применяться методы процедурной генерации: создание 3D-моделей объектов (домов, дорог, деревьев) и текстур с помощью специальных алгоритмов. Такие 3D-модели и текстуры могут создаваться заранее либо «на лету» непосредственно в процессе работы программного обеспечения виртуального глобуса на компьютере пользователя [Бобков, Леонов, 2015].

В качестве основы для процедурной генерации могут использоваться векторные карты, растровые аэро- и космоснимки. С использованием методов процедурной реконструкции можно сделать грубый рельеф более подробным и детальным (например, добавив неровности рельефа – овраги, скалы, барханы и т.п.), разместить реалистичные спрайтовые или трехмерные модели деревьев в лесных массивах (например, на основе векторных карт растительности), автоматически сгенерировать 3D-модели зданий и дорог с разметкой и дорожной инфраструктурой (например, на основе 2D-контуров на векторных картах) и т.д. При этом нет необходимости постоянно хранить полученные 3D-модели, при необходимости их можно сгенерировать заново. Это позволяет ускорить сетевую работу с моделью территории: по сети достаточно передавать только исходные данные.

Визуализацию 3D-модели территории с использованием методов процедурной генерации можно рассматривать как отображение топографической карты с помощью специальных (трехмерных) условных знаков. В картографии существует понятие «генерализации», обозначающее процесс отбора и обобщения объектов карты для отображения на более мелких масштабах. Процедурную 3D-реконструкцию территорий можно рассматривать, как обратный процесс, т.е. «детализацию» карты.

Процедурная реконструкция позволяет обеспечить высокую детализацию и визуальный реализм территории на поверхности виртуального глобуса, эту детализацию можно варьировать в зависимости от производительности аппаратного обеспечения. На сегодняшний день,

применение процедурной генерации является основной тенденцией развития виртуальных глобусов. Активно развиваются технологии автоматического построения 3D-моделей домов как с помощью фотограмметрии по данным ДЗЗ и фотопанорам, рисунок 3.55, так и на базе векторных ГИС-данных; технологии реалистичной визуализации больших массивов деревьев, рельефа, воды. Наибольших успехов в этой области достиг проект Outerra (начат в 2008 г.), который в итоге был использован для создания военного симулятора, рисунки 3.56-3.57. Есть также несколько исследовательских проектов, например, Proland и Biosphere3D.

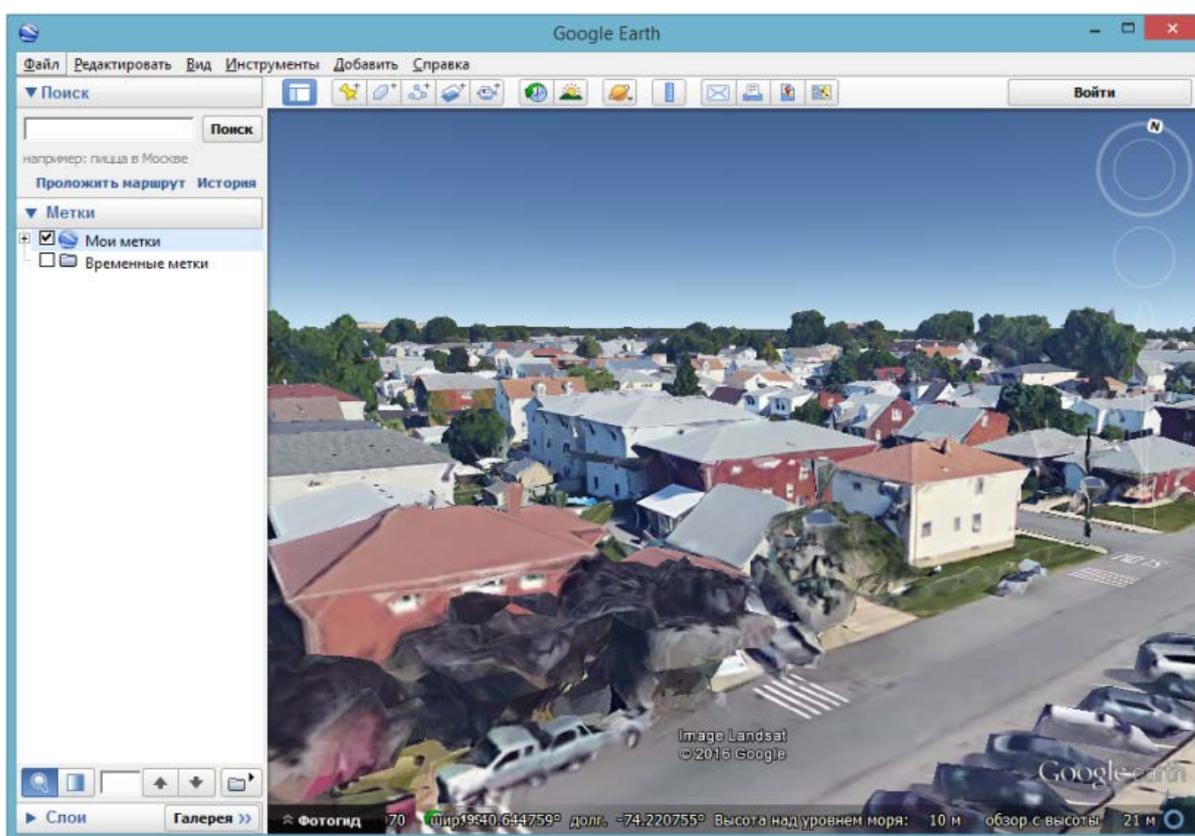


Рисунок 3.55 — Дома в Google Earth, сгенерированные автоматически с помощью фотограмметрии.



Рисунок 3.56 — Поверхность виртуального глобуса Outerra в максимальном приближении.



Рисунок 3.57 — Авиационный тренажер на основе виртуального глобуса Outerra.

На сегодняшний день, программный инструментарий Outerra обладает впечатляющими возможностями по процедурной генерации. Трехмерный рельеф детализируется с помощью фрактальных алгоритмов, добавляются

камни, скалы; рельеф подстраивается под дорожную сеть (в нужных местах выравняется). Рельеф можно динамически деформировать: добавлять кратеры, воронки от взрывов. Процедурно генерируется растительность: деревья, кустарники, трава. Учитывается карта биомов: разные виды деревьев растут на разных территориях. Поддерживаются различные визуальные эффекты: реалистичное атмосферное рассеяние, моделирование воды, динамические тени.

Визуализация подземных данных. Виртуальный глобус может применяться для визуализации разнообразных научных данных, в том числе подземных (например, сейсмических). Хотя визуализация объектов ниже поверхности земли не поддерживается большинством популярных виртуальных глобусов, есть успешные реализации в рамках отдельных исследовательских проектов [Бобков и др., 2012а], [Бобков и др., 2012б], которые будут подробно рассмотрены в следующем разделе данной главы.

При использовании полупрозрачного глобуса, разные подземные и наземные объекты начинают накладываться друг на друга, что затрудняет восприятие данных. Для того чтобы визуально разделить группы объектов между собой, необходимо специальным образом настроить порядок и режимы их отрисовки. Важную роль при этом играет поддержка стереоскопического режима отображения, т.к. при этом существенно упрощается визуальное разделение групп объектов, расположенных на разном расстоянии.

Отображение разных видов сейсмических данных в едином контексте на базе глобуса позволяет анализировать зависимости между данными. Например, комплексная визуализация сейсмических данных, связанных с вулканической активностью, может быть дополнена показом геологических моделей (границы тектонических плит, структуры очага и каналов) и анимацией извержений. Движение магмы к земной поверхности сопровождается роями землетрясений, изменениями скоростей распространения сейсмических волн под вулканическим комплексом.

Согласованный показ всех этих данных дает возможность комплексного анализа динамики процесса, рисунки 3.58-3.59.

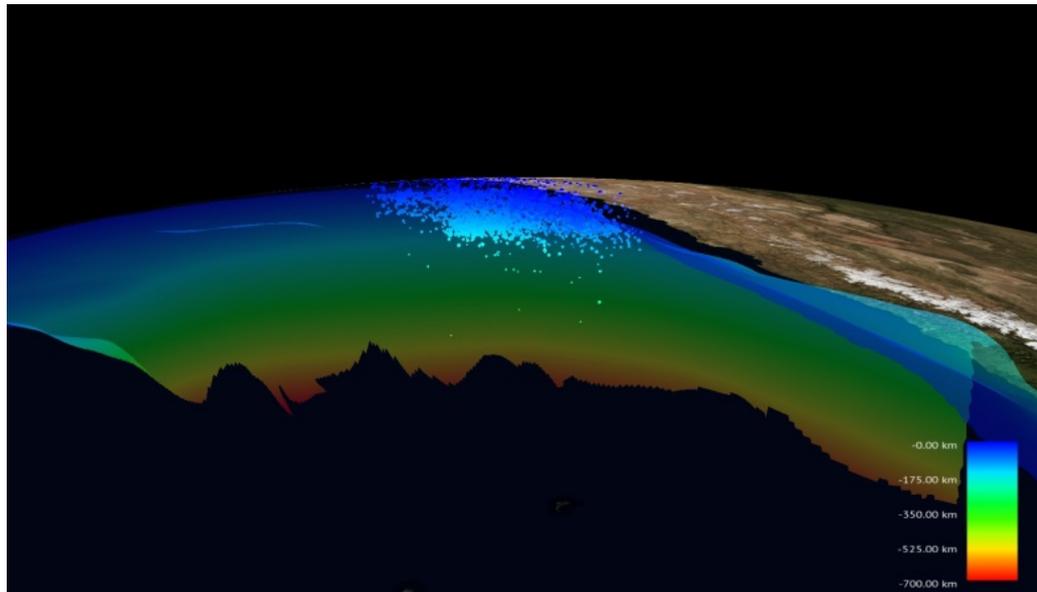


Рисунок 3.58 — Визуализация геофизических данных с сайта USGG (каталоги гипоцентров землетрясений USGS Earthquakes catalog и форма зон субдукции USGS Subduction zones) на полупрозрачном глобусе.

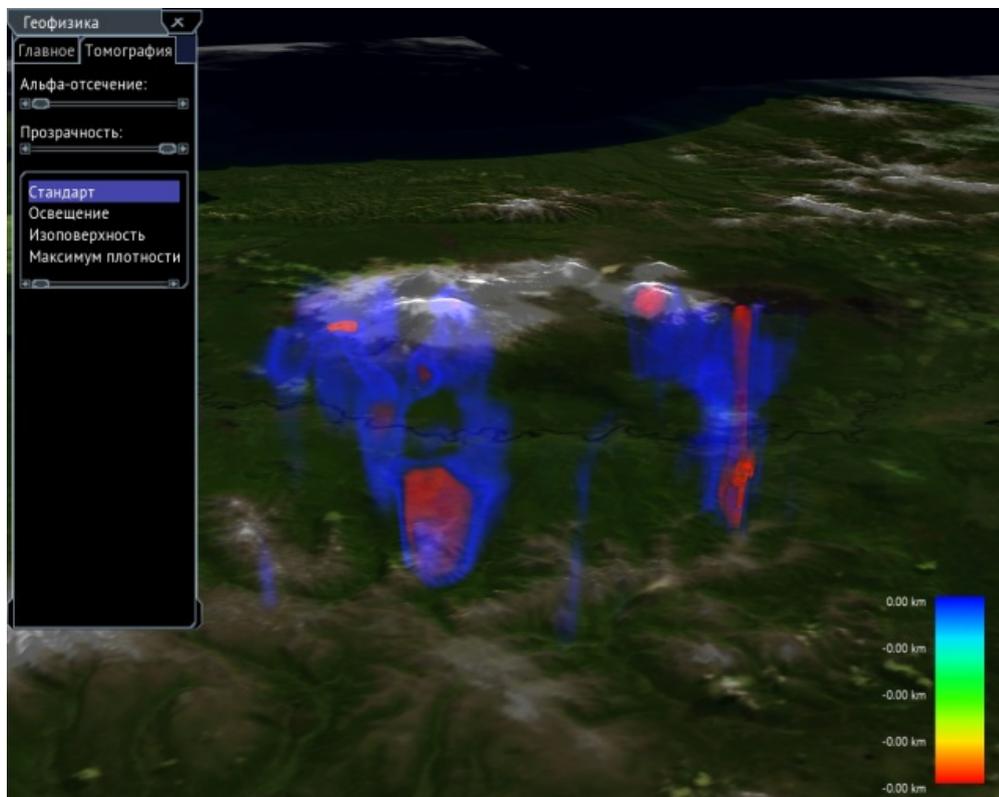


Рисунок 3.59 — Пример визуализации результатов сейсмической томографии на полупрозрачном глобусе (по данным И. Ю. Кулакова, ИНГГ СО РАН).

Заключение. Есть 2 точки зрения на дальнейшее использование и перспективы виртуальных глобусов: романтическая и прагматичная.

Романтическая точка зрения описана в романе Нила Стивенсона – это создание единой актуальной глобальной базы данных о нашей планете, включающей рельеф, леса, дороги, адреса, организации, события и т.д. Однако, на сегодняшний день уже очевидно, что в отличие от проекта OpenStreetMap, который наполняется усилиями немногочисленных добровольцев, такая глобальная база данных должна будет обновляться и уточняться в значительной степени автоматически, или хотя бы полуавтоматически. Можно предположить, что персональные электронные устройства и встроенные в них камеры могут в будущем использоваться как огромный распределенный массив датчиков. Данные GPS, фотографии и видеосъемки, добровольно отправляемые в сеть с персональных устройств, могут агрегироваться для построения и уточнения модели рельефа и 3D-моделей домов. От пользователя, вероятно, потребуется лишь однажды поставить где-то галочку «Разрешаю использовать данные со своего смартфона для уточнения виртуальных глобусов». Отметим, что идея использования современных гаджетов для сбора информации, в т.ч. в игровой форме, витает в воздухе; одним из свежих примеров является «игра» Pokemon Go.

Прагматичный взгляд на виртуальные глобусы предполагает их использование только там, где это действительно оправдано. Например, в учебном процессе для наглядной демонстрации материала, в научной визуализации, симуляторах. При этом традиционные задачи (поиск маршрутов, измерение расстояний, анализ геоданных) по-прежнему будут решаться преимущественно с использованием плоских электронных карт. Здесь показательна итоговая судьба глобуса Google. Отказавшись от поддержки плагина для браузеров, разработчики не стали создавать новое отдельное приложение с виртуальным глобусом. Вместо этого они добавили виртуальный глобус в веб-приложение «Google Карты» в качестве

специального режима, про существование которого знают только те, кому это действительно нужно.

3.3.2 Обзор подходов к процедурной генерации объектов на виртуальных глобусах

При разработке виртуальных сцен для систем виртуальной реальности часто возникает задача создания визуально реалистичной 3D-модели территории с расположенными на ней объектами. Эта задача особенно актуальна при разработке тренажеров, симуляторов, ситуационных центров, геоинформационных систем.

Требования к точности соответствия виртуальной сцены и реальной территории, как правило, различаются для различных элементов этой сцены. Поэтому необходимо разделить понятия метрической точности и детализации элементов сцены.

Для создания метрически точных 3D-моделей реальных объектов могут применяться методы лазерного сканирования, фотограмметрии, ручного моделирования по чертежам и фотографиям. Для точного расположения 3D-моделей на местности – методы привязки по спутниковым снимкам, методы геодезии.

Но далеко не все объекты, расположенные на местности, требуется моделировать и размещать метрически точно; многие элементы необходимы лишь для создания эффекта визуальной реалистичности (например, растительность) и могут быть смоделированы с той или иной степенью условности. Некоторые из таких объектов должны лишь размещаться метрически точно (дома, дороги), для других не требуется даже точность размещения (растительность). Для создания таких условных моделей объектов с высоким уровнем детализации могут применяться методы процедурной генерации: а именно, создание 3D-моделей объектов и текстур с помощью специальных алгоритмов, в том числе «на лету» [Бобков, Леонов, 2015].

В качестве основы для 3D-реконструкции территории могут быть использованы векторные топографические карты и растровые снимки, полученные спутниковой или аэрофотосъемкой. В этом случае визуализацию 3D-модели территории можно рассматривать как отображение топографической карты с помощью специальных (трехмерных) условных знаков. В картографии существует понятие «генерализации», обозначающее процесс отбора и обобщения объектов карты для отображения на более мелких масштабах [Encyclopedia..., 2008]. Процедурную 3D-реконструкцию территорий можно рассматривать, как обратный процесс, т.е. «детализацию» карты.

Используя векторные карты, спутниковые снимки и цифровые модели рельефа, можно сделать грубый рельеф более подробным и детальным, разместить 3D-модели деревьев в лесных массивах, построить 3D-модели зданий по 2D-отпечаткам, сгенерировать 3D-модели дорог с разметкой и дорожной инфраструктурой и др.

Процедурная реконструкция позволяет обеспечить высокую детализацию 3D-моделей, эту детализацию можно варьировать в зависимости от производительности аппаратного обеспечения. При этом нет необходимости хранить полученные 3D-модели, при необходимости их всегда можно сгенерировать заново. Это позволяет ускорить сетевую работу с моделью территории: по сети достаточно передавать только исходные данные.

Модель территории с высокой детализацией может быть внедрена на виртуальный глобус [Cozzi, Ring, 2011], [Бобков, 2013a] и такие решения приобретают все большую популярность. Существует ряд программных продуктов, где методы процедурной генерации применяются для повышения реалистичности виртуального глобуса: Outerra (<http://www.outerra.com/>), Proland (<http://proland.inrialpes.fr/>), Blueberry3D (<http://www.blueberry3d.com>), Biosphere3D (<http://sourceforge.net/projects/biosphere3d>), osgEarth (<http://osgearth.org>).

Рассмотрим методы, которые применяются для процедурной реконструкции территорий, и общие подходы к генерированию и визуализации 3D-моделей территорий по исходным данным с добавлением деталей методами процедурной генерации на виртуальном глобусе.

Исходные данные. Исходные данные можно разделить на две категории: растровые (спутниковые и аэрофотоснимки) и векторные (топографические карты и другие). Некоторые из них могут быть глобальными (заданными для всей поверхности Земли), некоторые – локальными (заданными только для ограниченной территории).

В настоящее время в свободном доступе находится растровое покрытие для всей Земли NASA Blue Marble Next Generation с разрешением 500 м без облаков. Спутниковые снимки более высокого разрешения выполнены в отдельных спектральных диапазонах, каждый снимок охватывает только один небольшой участок земли. Могут быть также использованы производные растровые данные: карта водных территорий, карта биомов, карта альбедо, карта температуры поверхности.

Также необходима цифровая модель рельефа (ЦМР), или в терминах компьютерной графики «карта высот». В свободном доступе имеется карта высот для всей Земли ASTER GDEM с разрешением 30 м. Однако она имеет высокую погрешность по высоте, что приводит к неровностям там, где их быть не должно: поверхность воды, продольный и поперечный профиль дорог. Также эта ЦМР включает высоту объектов на рельефе, что затрудняет ее использование для задач визуализации.

Полноценная 3D-реконструкция территории невозможна без векторных данных, которые содержат информацию об объектах на рельефе: домах, дорогах и других объектах.

Векторные данные представлены топографическими картами. В России стандартный формат хранения векторных карт – SXF, однако топографические карты масштаба 1:50000 и крупнее засекречены, что делает

невозможным их использование в гражданских проектах. Также карты в формате SXF хранятся по отдельным номенклатурным листам.

Альтернативный источник векторных данных – это свободная карта OpenStreetMap, которая наполняется и редактируется добровольцами из разных стран мира. Недостатком этой карты является неравномерность наполнения данными разных территорий.

Предобработка исходных данных. Во время визуализации обычно используется геоцентрическая система координат на базе датума WGS84. Исходные данные могут быть в разных системах координат, как геоцентрических, так и в картографических. Для быстрого доступа к данным во время визуализации необходимо их преобразовать в систему координат WGS84. Отметим, что в принципе можно использовать любую геоцентрическую систему координат, например ПЗ-90.11, которая является государственным стандартом в России. Однако в существующем ПО лучше всего поддерживается система координат WGS84.

Множество спутниковых снимков для одной территории должны быть сшиты в единое покрытие без облаков. Спектральные каналы необходимо объединить для получения цветного RGB-изображения. Если векторные данные разрезаны на листы, то они также должны быть объединены в единый набор данных, и объекты карты, пересекающие границы листов сшиты друг с другом.

Также для эффективного использования этих исходных данных на следующих шагах необходима дополнительная информация о точках растрового покрытия и об объектах карты. Они должны быть классифицированы. Для каждой точки поверхности необходимо знать тип территории (луг, лес, пустыня и т.д.). Эту информацию можно получить путем анализа исходных спутниковых снимков, до объединения спектральных каналов. Такая работа была проделана специалистами Европейского космического агентства по данным сенсора MERIS, в результате чего была разработана карта классификации территорий

GlobCover 2009 с разрешением 300 м/пиксель. При необходимости можно проделать аналогичную работу для выбранной территории с более высоким разрешением.

Проблема классификации также стоит для векторных топографических карт. Для каждого объекта карты необходимо знать его тип (дорога, река, здание и т.п.). В России используется стандартный формат RSC для хранения классификатора для SXF-карт. Однако для карт разных масштабов применяются разные классификаторы, и у формата RSC много проблем, обсуждение которых выходит за рамки статьи. В карте OpenStreetMap для каждого объекта карты хранятся теги: пары ключ-значение, что позволяет классифицировать каждый объект. Однако значения тегов не стандартизированы, и этот формат не совместим с RSC. Поэтому возникает задача разработки единого классификатора (это можно сделать, опираясь на язык описания онтологий OWL), и дальнейшая переклассификация входных векторных данных. Для каждого нового источника данных необходимо писать свой конвертер, который будет анализировать атрибуты исходных данных и подбирать нужный код классификатора.

Для визуализации некоторых типов объектов помимо кода классификатора необходима дополнительная атрибутивная информация (семантика). Это может быть, например, количество полос у дороги, количество этажей у здания. Если в исходных данных эти атрибуты отсутствуют, то необходимо их оценить, чтобы не нарушать целостность 3D-сцены. Так, например, количество этажей у дома можно взять равным этажности соседнего дома, у которого этот атрибут задан.

Для визуализации дорог и рек необходимо также по исходным данным построить графы дорог и рек соответственно. Для каждого фрагмента дороги необходимо хранить информацию, с какими другими фрагментами он стыкуется, чтобы впоследствии корректно визуализировать перекрестки.

Обработанные и преобразованные данные нужно поместить в базу данных или файловое хранилище для быстрого доступа. Объем данных

может быть очень велик, поэтому обычно хранят данные, сгруппированные по тайлам. Во время визуализации в память приложения должны подгружаться только те тайлы, которые попадают в объем видимости. 3D-модель строится «на лету» только для подгруженных тайлов.

Реконструированная 3D-модель территории может быть просмотрена с разной высоты. Чтобы уменьшить объемы обрабатываемой информации, необходимо хранить также уменьшенные наборы данных более низкой детализации. Эти наборы могут быть предварительно автоматически сгенерированы на основе исходного набора данных.

Для хранения векторных данных лучше подходит БД, для растровых – хранение в виде дерева тайлов (отдельных файлов) на диске. Схема разбиения растровых изображений на тайлы стандартизирована под названием Tile Map Service (TMS, OpenGIS Web Map Tile Service Implementation Standard. Open Geospatial Consortium Inc. Reference number OGC 07-057r7), аналогичный подход можно применять для векторных данных.

Все современные базы данных имеют поддержку географических типов данных. Наиболее развитые и широко используемые – это Oracle Spatial и PostGIS (расширение PostgreSQL).

Дополнительные ресурсы для процедурной генерации. Помимо исходной информации о территории и об объектах территории, необходимы дополнительные файлы с данными для алгоритмов процедурной генерации. Для покрытия рельефа – это детальные текстуры разных типов территорий: трава, гравий, пустыня, снег и т.д. Для визуализации лесов необходимы 3D-модели разных типов деревьев. Можно брать готовые 3D-модели, либо генерировать их процедурно «на лету» на основе заданных настроек. Каждому типу дерева должна соответствовать своя 3D-модель, либо набор настроек для генерации [Re et al., 2009]. Для каждой детализированной 3D-модели необходимо подготовить набор плоских изображений – спрайтов – для просмотра с больших расстояний. Для генерации разных типов зданий

необходимы специальные алгоритмы, которые активно разрабатываются в мире. Один из самых известных проектов – Esri CityEngine (<http://www.esri.com/software/cityengine>). В России был разработан, например, алгоритм генерации «хрущевок» (<http://habrahabr.ru/post/196862/>). Для более мелких объектов инфраструктуры можно использовать типовые 3D-модели (фонарные столбы, остановки общественного транспорта, знаки дорожного движения).

Построение рельефа. Визуальное представление модели территории делается «на лету» в зависимости от положения виртуальной камеры. 3D-модели строятся только для тех участков территории, которые попадают в объем видимости виртуальной камеры. Можно выделить отдельно задачу построения и рендеринга рельефа, и отдельно – объектов на рельефе.

Для каждого тайла исходных данных строится своя 3D-модель тайла рельефа в виде регулярной полигональной сетки. Для этого нужна карта высот, текстура с цветом поверхности, и карта бликов.

На низких уровнях детализации можно использовать непосредственно исходные данные, описанные выше. На более высоких уровнях детализации необходимо процедурно добавлять детали и выпрямлять рельеф.

Для создания детального изображения рельефа можно использовать стандартный подход совмещения текстур по маске (texture splatting). В этом подходе используется сгенерированная текстура с маской территории, в каждом пикселе которой записан тип территории. Во время рендеринга в шейдере по типу территории из маски выбирается одна из детальных текстур (трава, гравий, пустыня, снег), которые также передаются в шейдер в виде массива текстур. По мере перехода к более высоким уровням детализации должен происходить плавный переход от исходного изображения на базе спутникового снимка к детальному изображению на базе детальных текстур.

Маска может генерироваться «на лету» по векторным данным. Карта бликов также может генерироваться по векторным данным, которые, как правило, включают в себя информацию о водных объектах, дающих блики.

Также необходимо добавить высокочастотный шум к карте высот для моделирования мелких неровностей. За основу можно взять шум Перлина [Lagae et al., 2010], [Wells, 2005]. При добавлении шума можно учитывать характеристики базовой поверхности (уклон, тип территории). Далее, используя векторные данные, необходимо выровнять отдельные участки карты высот: реки, озера, площадки под домами, поперечный профиль дорог.



Рисунок 3.60 — Схема потоков данных при процедурной генерации объектов на виртуальном глобусе

Схема потоков данных представлена на рисунке 3.60 [Бобков, Леонов, 2015]. Цифровая модель рельефа (ЦМР), векторные данные и снимки готовятся заранее. Шум Перлина, текстуры-маски генерируются «на лету» один раз при создании тайла, и могут в дальнейшем быть закэшированы. Карта теней от объектов обновляются каждый кадр.

При подготовке текстур-масок по векторным данным применяются два подхода: подготовка на графическом процессоре (рендеринг в текстуру) и

подготовка на центральном процессоре (программная растеризация). Оба подхода имеют свои плюсы и минусы.

В первом случае векторные данные рендерятся в текстуру с помощью графического процессора. Готовая текстура хранится в видеопамяти. Этот метод работает быстро, однако не очень удобен при подготовке сложных текстур (при упаковке разных данных в разные каналы одной текстуры).

Во втором случае текстура готовится сначала полностью в оперативной памяти (векторные данные растеризуются), а потом загружается на видеокарту. Это более медленный способ, однако, более гибкий, и он позволяет кэшировать готовые текстуры на диске.

Реконструкция объектов на рельефе. Основные типы объектов на рельефе – это растительность, здания и дороги. Остальные объекты с точки зрения реконструкции можно отнести к одному из этих типов.

Растительность (например, деревья) расположена на участках, которые обозначены площадными объектами на векторной карте. Участки должны содержать атрибуты с информацией о типе растительности. На каждой территории могут расти разные виды деревьев. Атрибутивная информация может включать как конкретные названия деревьев, так и название типовой экосистемы (биома). Для каждого типа дерева генерируются случайные точки в рамках каждого площадного объекта – положения 3D-моделей. Деревья могут располагаться равномерно, либо можно также учитывать уклон рельефа по данным ЦМР. Пример процедурной генерации деревьев на рельефе приведен на рисунке 3.61. Основная сложность при рендеринге деревьев – это их количество, а также необходимость генерации теней от деревьев на рельефе. Вдали детальные 3D-модели деревьев можно заменять плоскими спрайтами, а для генерации теней использовать специальную упрощенную геометрию [Bruneton, Neyret, 2012].

Векторные карты крупного масштаба содержат 2D-отпечатки домов. Для реконструкции 3D-моделей эти объекты карты должны также иметь специальные атрибуты. Как минимум, это этажность дома, тип архитектуры

и назначение дома (жилое, промышленное и т.д.). По 2D-отпечатку можно восстановить коробку дома нужной высоты и наложить типовую текстуру. Пример процедурной генерации домов на основе карты OpenStreetMap приведен на рисунке 3.62. При приближении нужно генерировать более детальные модели домов с подъездами, окнами, антеннами на крышах [Smelik, 2011]. Можно также учитывать время суток: для большей реалистичности, ночью в некоторых окнах домов может гореть свет.

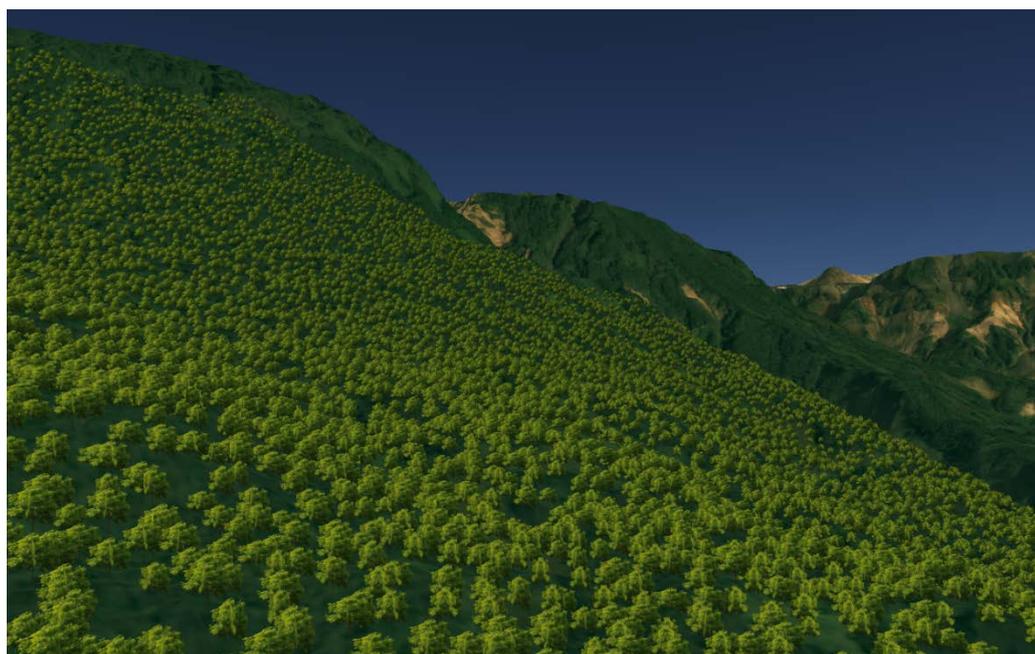


Рисунок 3.61 — Процедурная реконструкция растительности в виртуальной модели территории в районе Долины гейзеров на Камчатке.

Если векторная карта представлена в виде списка дорог, необходимо предварительно построить граф дорог – найти и учесть стыки и пересечения дорог, чтобы можно было построить 3D-модель перекрестка. Линейные объекты карты, представляющие дороги, должны иметь необходимые атрибуты: тип дороги, количество полос или ширина. Имея эту информацию, можно сгенерировать 3D-модели всех дорог и перекрестков, наложить разметку и добавить 3D-модели дорожной инфраструктуры [Bruneton, Neyret, 2008]. Также наличие графа дорог позволит смоделировать движение трафика, если это потребуется в симуляторе.



Рисунок 3.62 — Процедурная реконструкция городской застройки в районе станции метро «Шаболовская», г. Москва. 3D-модель Шаболовской радиобашни (на заднем плане) создана вручную

3.3.3 Применение виртуального глобуса для визуализации объектов истории науки и техники

Виртуальный глобус, в отличие от традиционных двумерных карт и геоинформационных систем (ГИС), позволяет отображать технические и природные объекты без отрыва от общегеографического контекста, в едином «пространстве» с другими, сколь угодно удаленными объектами, интересующими пользователя. Любой объект или процесс, являющийся предметом исследования историка науки и техники, имеет пространственную и временную привязку – а следовательно, может быть отображен на виртуальном глобусе. Таким образом, виртуальный глобус представляет собой естественную синтетическую среду для представления виртуальных 3D-моделей различных историко-технических и историко-научных объектов и процессов [Бобков, 2012].

Приложения на базе виртуального глобуса не ограничены «рамкой», как традиционная ГИС или карта. Важное преимущество виртуального

глобус – отсутствие искажений, присущих картографическим проекциям. Это особенно актуально для России, как самой большой страны мира, расположенной к тому же далеко от экватора. Использование реальных географических координат, растровой географической основы (спутниковых снимков) и открытых гипертекстовых форматов представления геоданных составляют основу нового подхода к работе с геопространственной информацией, который получил название «неогеографии».

Автором вместе с коллегами были разработаны приложения с использованием виртуального глобуса на основе osgEarth для визуализации местоположения 3D-моделей различных объектов, частично описанные в предыдущих разделах (Шуховская башня на Шаболовке, Денисова пещера на Алтае, Долина гейзеров на Камчатке и др.). Пример визуализации природной территории со сложным рельефом на виртуальном глобусе приведен на рисунке 3.63 [Леонов и др., 2012].

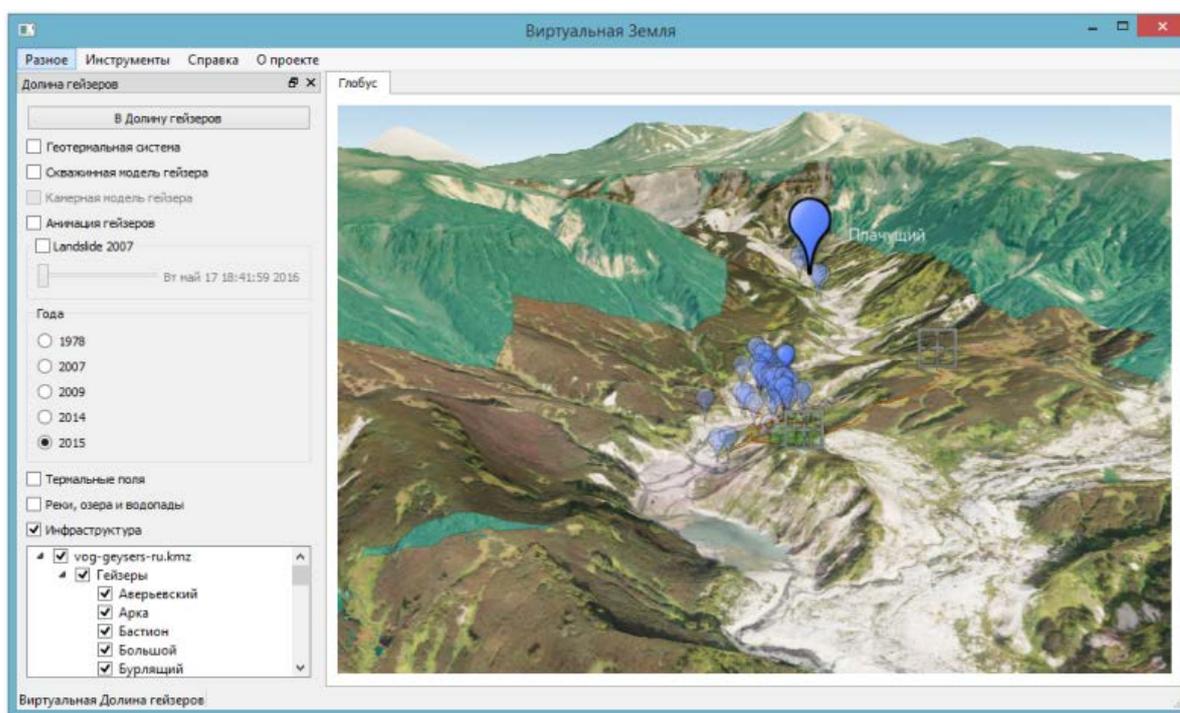


Рисунок 3.63 — Пример визуализации природной территории со сложным рельефом на виртуальном глобусе на основе osgEarth

Помимо визуализации объектов на поверхности земли, виртуальный глобус обеспечивает широкие возможности показа объектов, расположенных

в околоземном пространстве, а также объектов, расположенных ниже поверхности земли (например, моделей геологического строения или результатов геофизических исследований). Рассмотрим эти применения виртуального глобуса более подробно, т.к. они также представляют большой интерес с точки зрения виртуального музея истории науки и техники.

В 2012-2013 гг. было создано приложение на основе osgEarth для визуализации объектов, расположенных в околоземном пространстве: орбит космических полетов и моделей космических аппаратов (КА) [Бобков и др., 2013]. Ряд примеров показан на рисунках ниже.

Приложение обеспечивает визуализацию движения КА «Восток», «Восход», «Союз», космической станции «Мир» по реальным орбитам, реконструированным по историческим данным, рисунки 3.64-3.66. Поддержана визуализация исторических орбит комических полетов, включая траектории выведения и спуска, а также отображение полей падения на виртуальном глобусе, рисунок 3.67. Приложение позволяет наглядно отобразить трубки орбит космических полетов космических аппаратов одного типа, например, трубку орбит КА «Восток», рисунок 3.68.

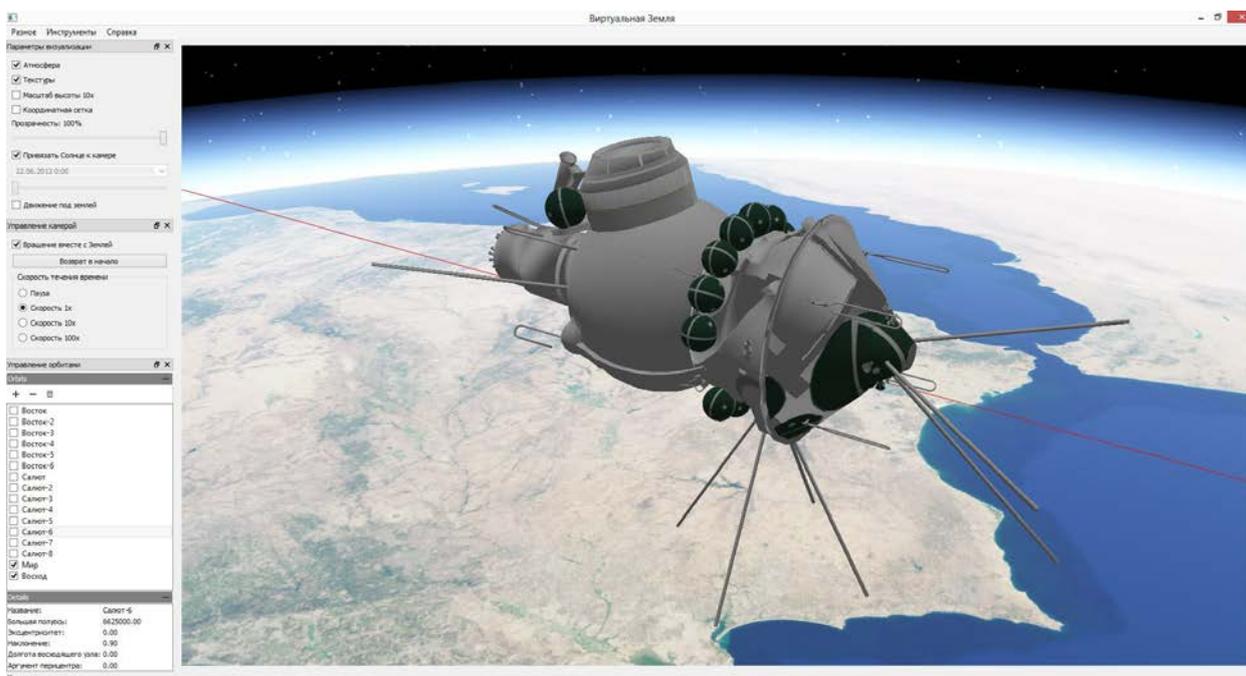


Рисунок 3.64 — Визуализация движения космического аппарата «Восход» по орбите с использованием виртуального глобуса на основе osgEarth



Рисунок 3.65 — Визуализация движения космического аппарата «Союз» по орбите с использованием виртуального глобуса на основе osgEarth

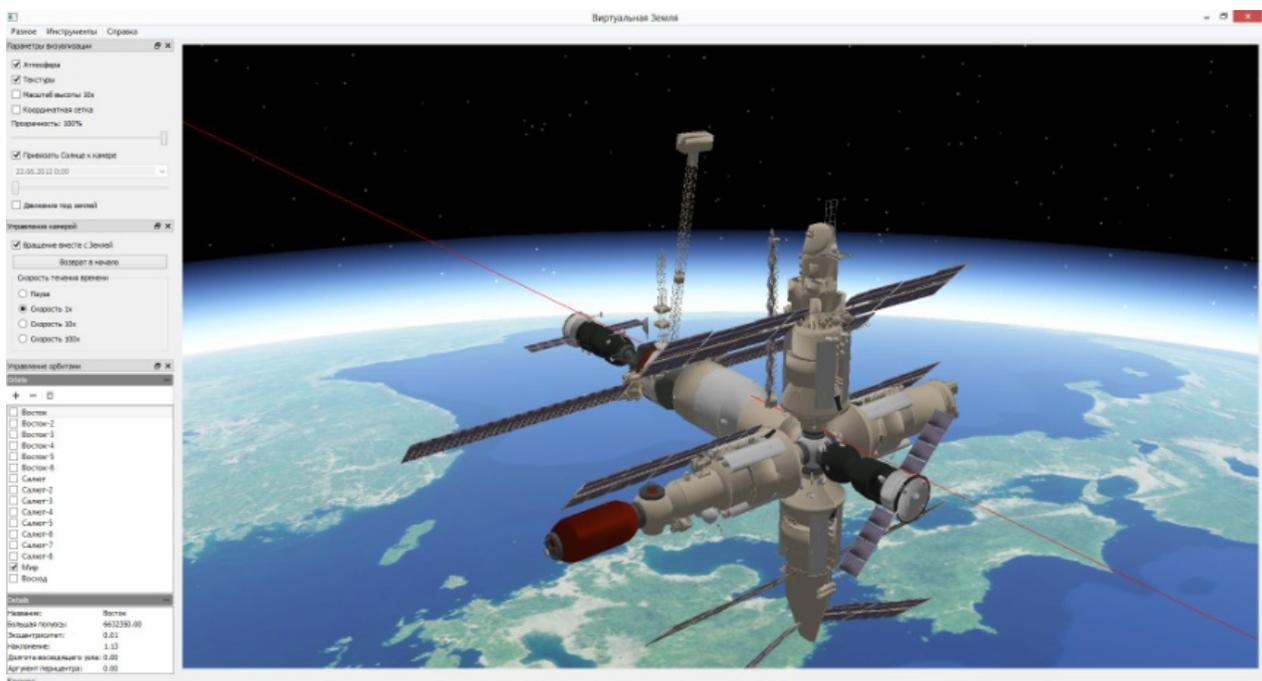


Рисунок 3.66 — Визуализация движения космической станции «Мир» по орбите с использованием виртуального глобуса на основе osgEarth.

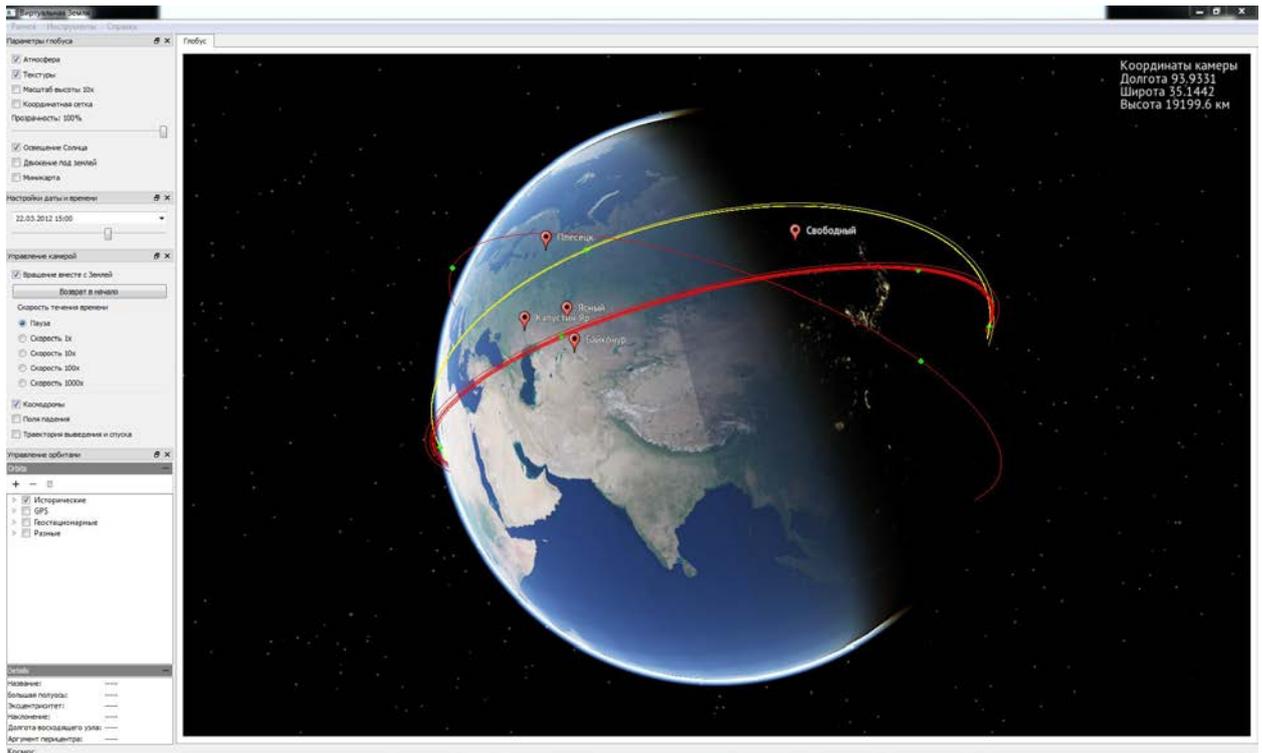


Рисунок 3.67 — Визуализация исторических орбит космических полетов

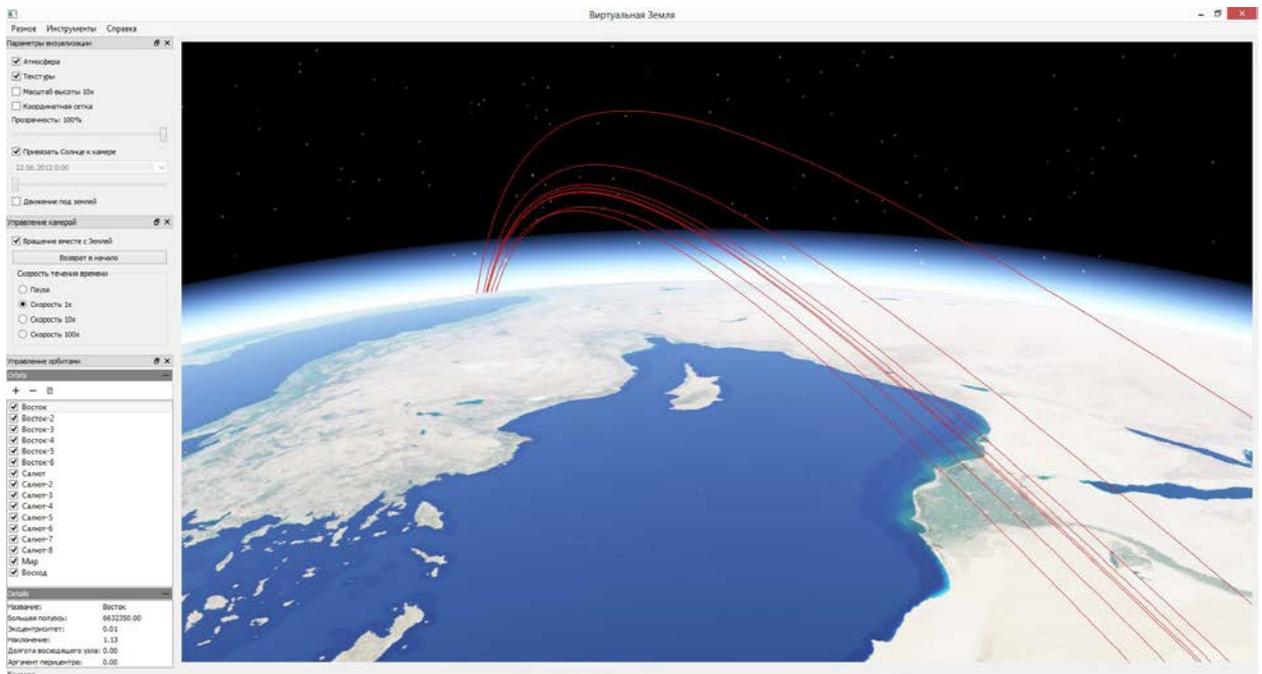


Рисунок 3.68 — Визуализация трубки орбит «Востоков», крупный план

В приложении поддержана визуализация поверхности Земли в двух режимах – дневном и ночном; имитировано освещение земли Солнцем, что позволяет реалистично отобразить вид Земли из космоса и линию

терминатора, рисунок 3.69. Особую наглядность виртуальный глобус в стерео режиме обеспечивает при отображении сложных пространственных конструкций, таких как орбиты группировки спутников GPS, рисунок 3.70.

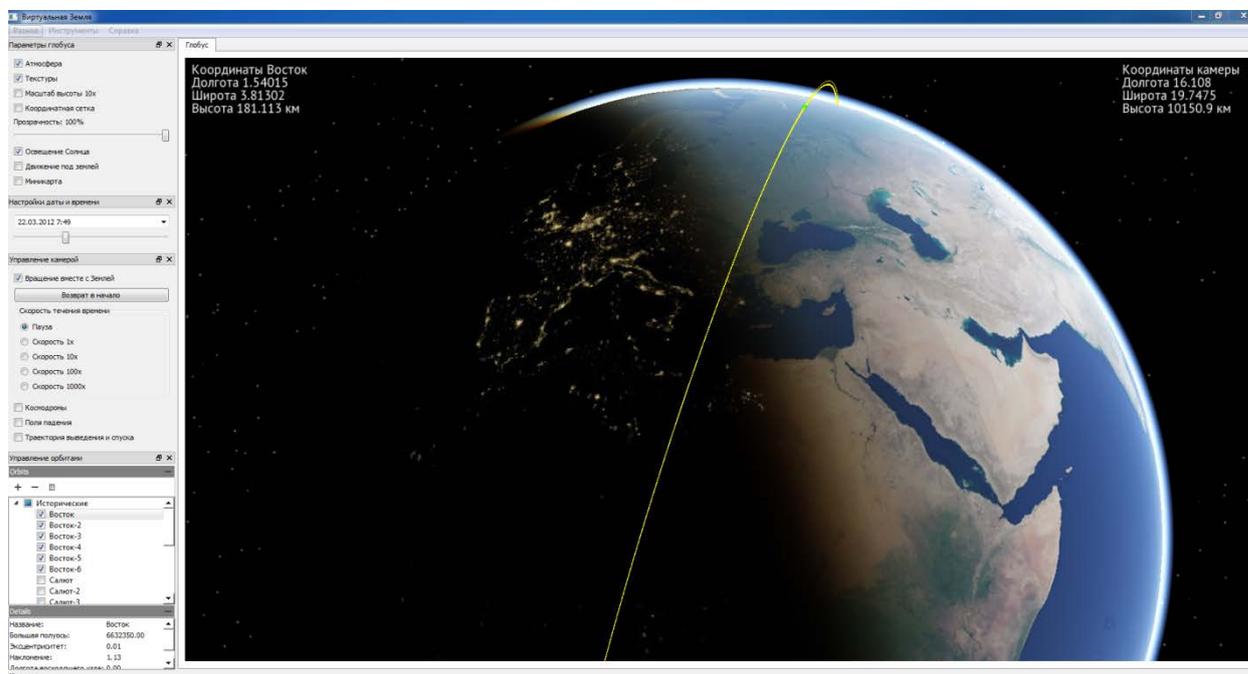


Рисунок 3.69 — Визуализация терминатора и трубки орбит «Востоков»

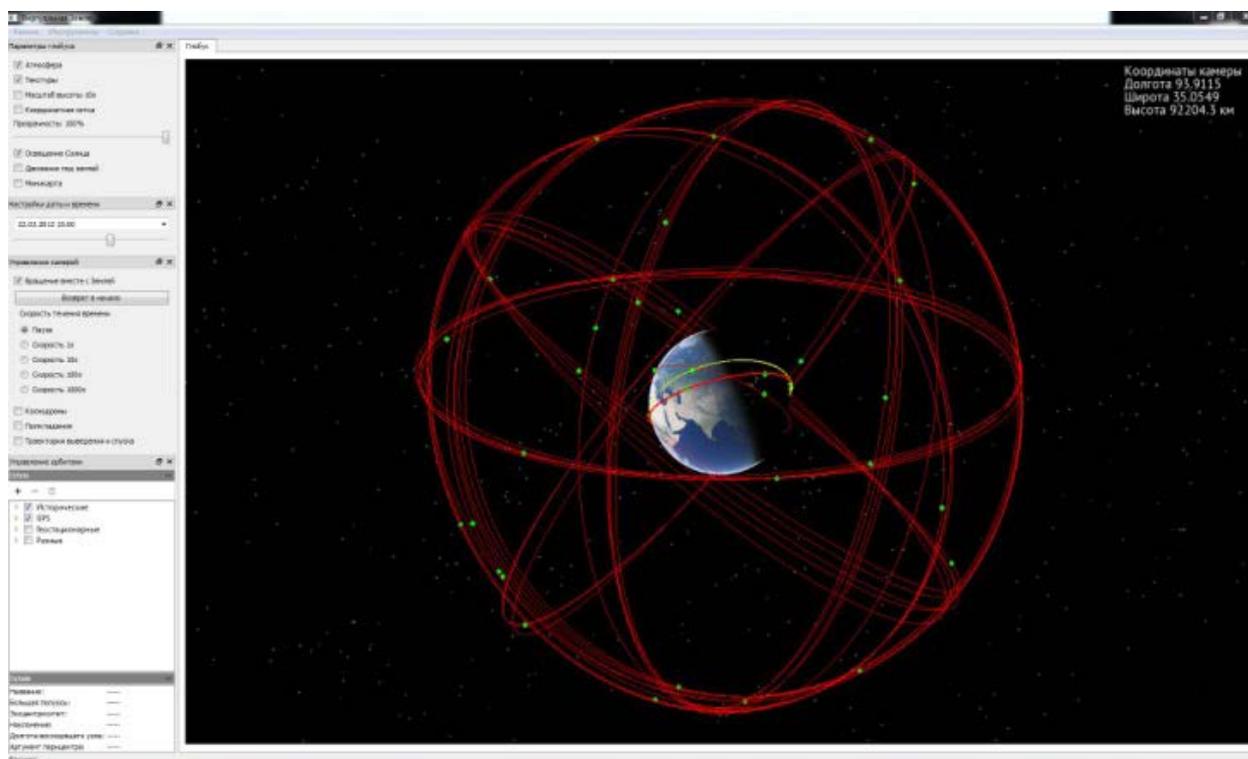


Рисунок 3.70 — Визуализация орбит группировки спутников GPS с использованием виртуального глобуса на основе osgEarth

В 2011-2012 гг. было создано приложение на основе osgEarth для визуализации объектов, расположенных ниже поверхности земли (результатов геофизических исследований и моделей геологического строения) [Белосохов и др., 2011], [Бобков и др., 2012а], [Бобков и др., 2012б]. Мотивация данной работы была обусловлена тем, что в настоящее время в геофизике активно развиваются методы трехмерного моделирования глубинных структур, визуального анализа данных, прежде всего, полученных на основе сетей инструментальных наблюдений. Однако в сфере представления данных по-прежнему используются в основном консервативные методы: плоские карты поверхности и сечения Земли.

Развитие технологий дистанционного зондирования земли обеспечило массовое построение точных виртуальных 3D-моделей ландшафта, что наряду с доступными средствами 3D-моделирования зданий и сооружений дало толчок к массовому применению методов неогеографии и 3D-документирования земной поверхности. В промышленной геологии и гидрогеологии построение 3D-моделей месторождений, рудных тел, водоносных горизонтов может опираться на данные о трехмерном распределении тех или иных параметров, полученные в результате бурения. В геофизике основой для построения 3D-моделей могут служить пространственные данные о сейсмической активности, данные сейсмозондирования и сейсмической томографии. Вместе с методами неогеографии (3D-моделями рельефа) это дает мощный инструмент для наглядной трехмерной визуализации как исходных данных, так и объемных моделей глубинного строения, построенных на их основе.

Науки о земле оперируют с геопространственными данными, то есть данными, которые имеют привязку к географическим координатам. Основой для 3D-визуализации таких данных является 3D-модель рельефа для соответствующей территории, а в общем случае – 3D-модель земного шара, или виртуальный глобус. Современные видеокарты позволяют работать с моделью земного шара целиком, обеспечивая интерактивную визуализацию

разнообразных данных в едином контексте на виртуальном глобусе с требуемым уровнем детализации. Становится популярным направление виртуальных глобусов, связанное с развитием аппаратного (видеокарты) и программного обеспечения (NASA World Wind и osgEarth).

Самое популярное приложение из разряда виртуальных глобусов, Google Earth, не предназначено для просмотра данных под поверхностью Земли, и не поддерживает стереоскопический режим отображения. Также эти функции не поддерживаются большинством современных виртуальных глобусов. Усилия разработчиков в этой области сейчас направлены главным образом на усовершенствование визуализации данных на поверхности Земли, повышение реалистичности, развитие эффектов атмосферы, воды, растительности и т. п. Трехмерная визуализация данных под поверхностью Земли на виртуальных глобусах, тем более в стерео-режиме, незаслуженно обойдена вниманием.

Нами был разработан программный комплекс для стереоскопической визуализации геофизических данных на основе виртуального глобуса [Бобков и др., 2012а], [Бобков и др., 2012б]. Для построения глобуса используются открытые данные. Реализованы различные режимы визуализации глобуса для разных задач, включая режим полупрозрачной поверхности, который позволяет просмотр подземных данных.

Реализована визуализация нескольких типов геофизических данных: каталоги гипоцентров землетрясений, форма зон субдукции, результаты сейсмической томографии и др.

Гипоцентры землетрясений показываются на реальной глубине под поверхностью глобуса. С помощью графического процессора можно одновременно показывать и фильтровать по разным параметрам более миллиона точек, рисунки 3.71-3.72.

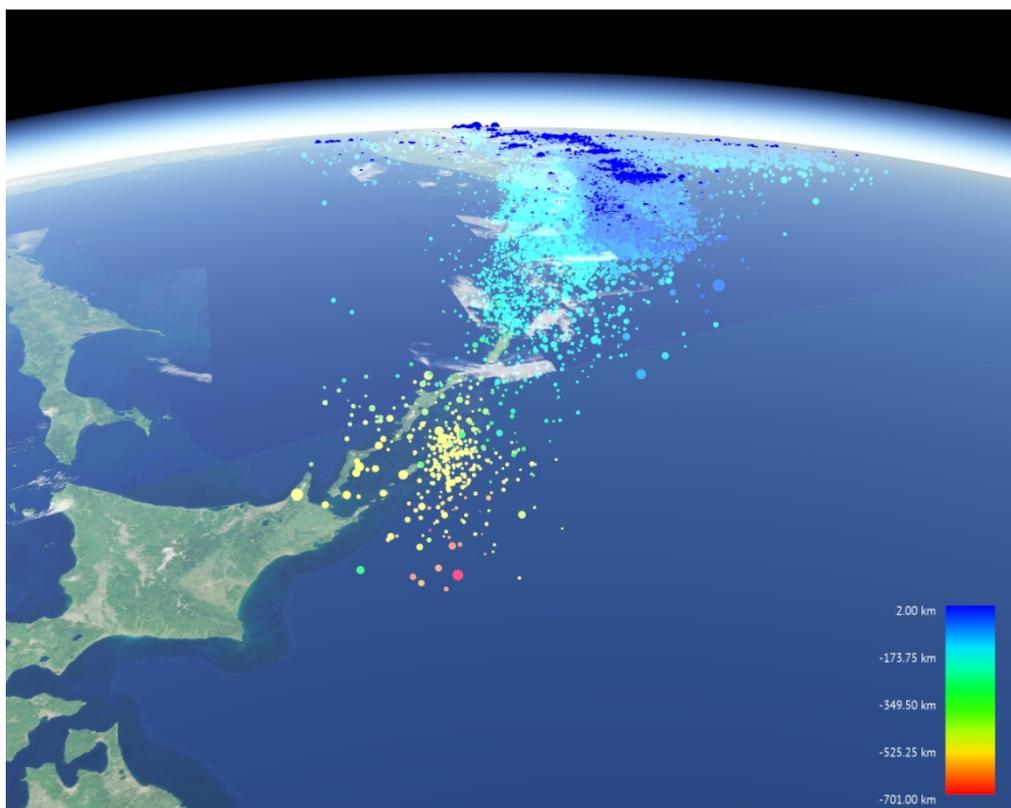


Рисунок 3.71 — Региональный каталог сейсмических событий в районе Курило-Камчатской дуги, по данным КФ ГС РАН

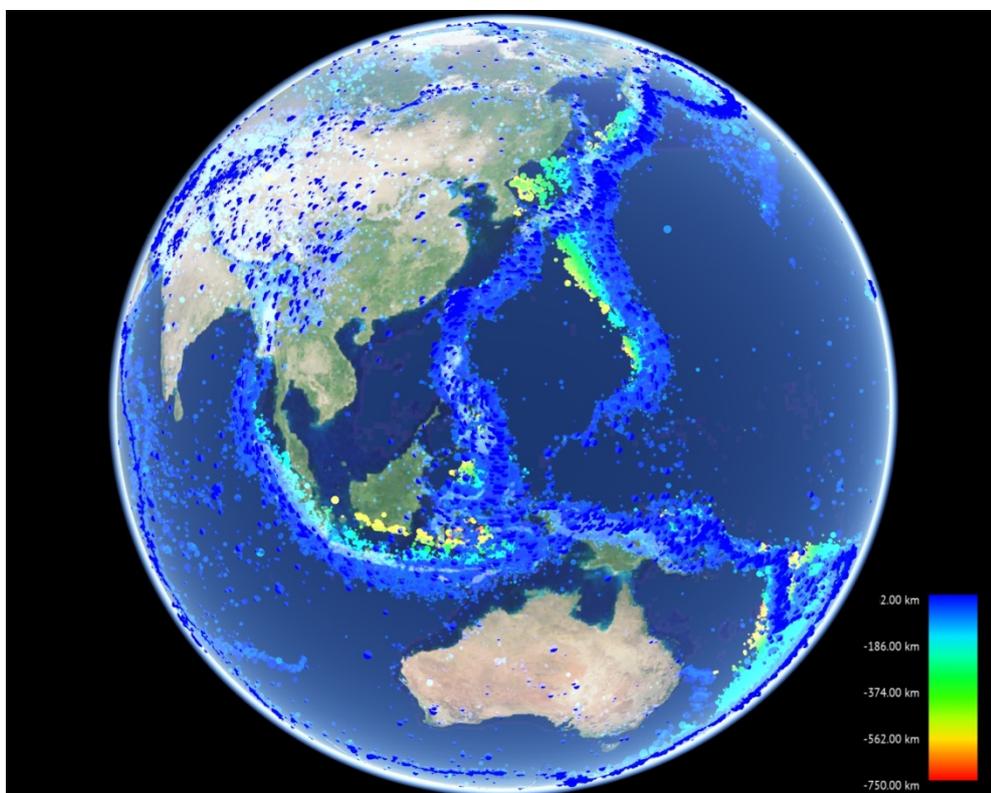


Рисунок 3.72 — Мировой каталог сейсмических событий USGS за 1900-2011 гг. по данным USGS в редакции А. В. Ландера (МИТП РАН)

Другой важный тип данных – это форма зон субдукции, рисунки 3.73-3.74. Исходные данные по форме зон субдукции выложены на сайте USGS.

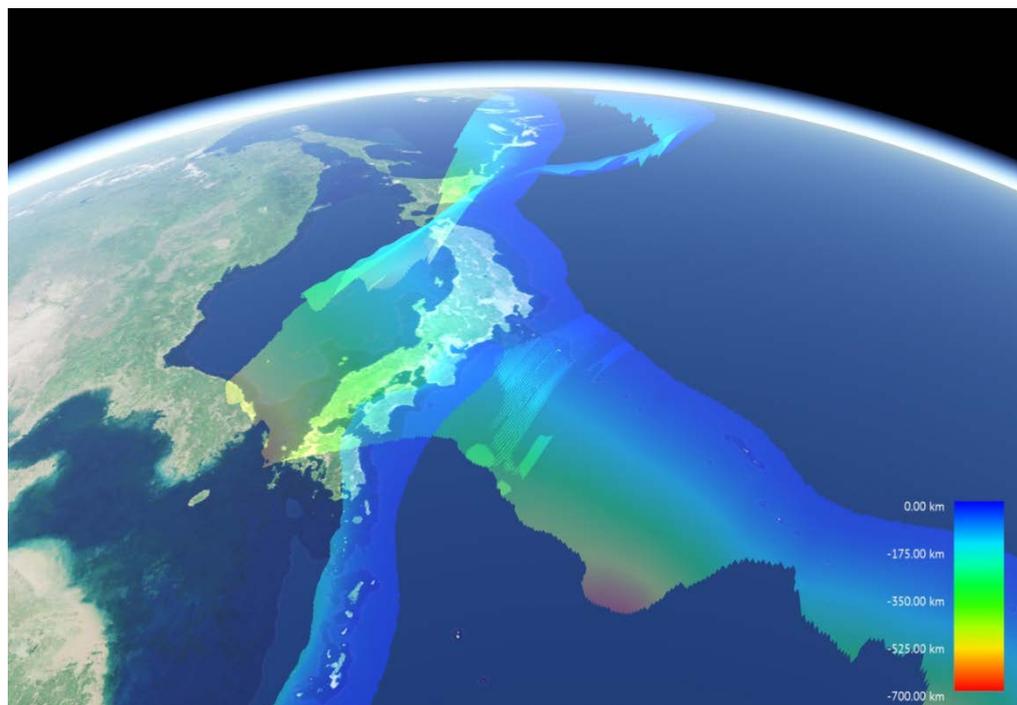


Рисунок 3.73 — Форма зоны субдукции в районе Японии, по данным USGS



Рисунок 3.74 — Демонстрация формы зон субдукции на виртуальном глобусе на ПДВ РАН, 2012 г.

Интересным и относительно новым типом геофизических данных являются данные сейсмотомографии, рисунок 3.75. Реализована модификация алгоритма прямого объемного рендеринга, которая позволяет учитывать кривизну эллипсоида. Поддержана плавная интерполяция данных во времени для показа ряда временных фреймов.

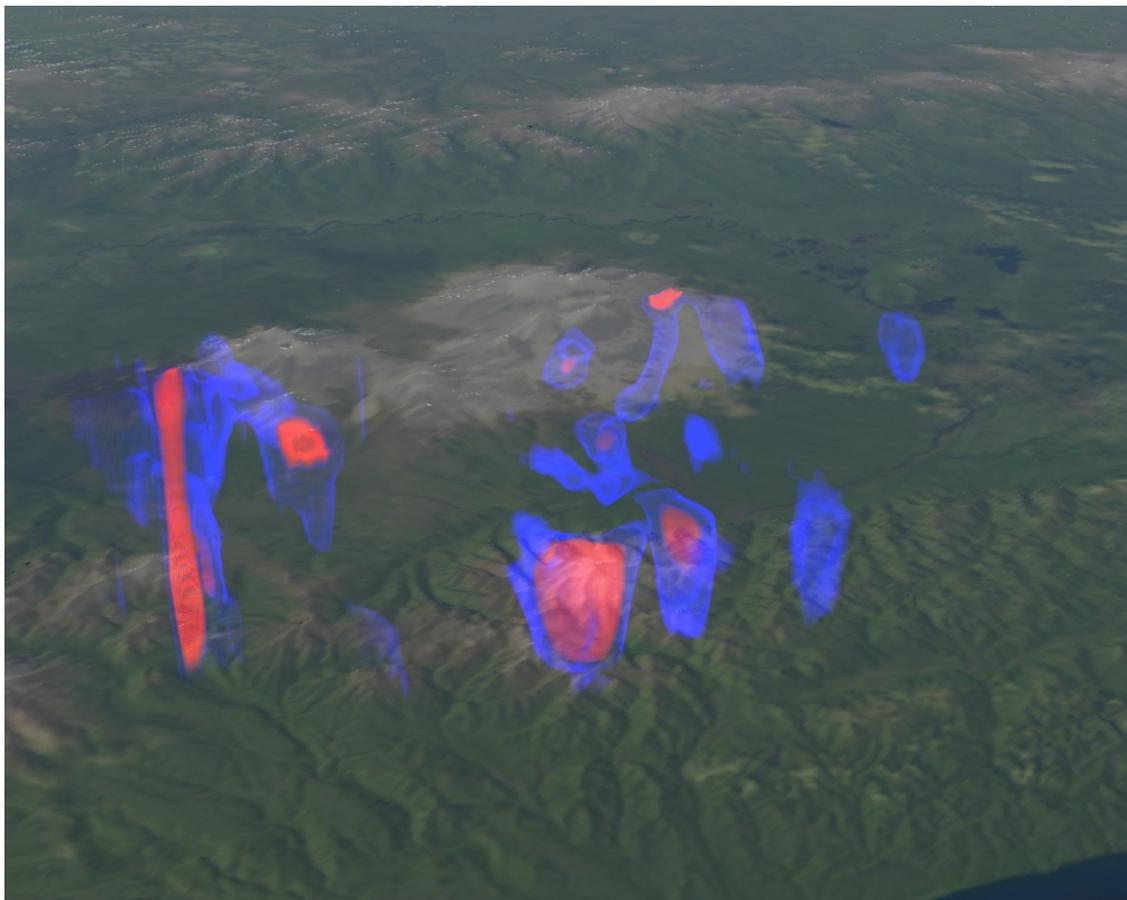


Рисунок 3.75 — Визуализация на виртуальном глобусе результатов сейсмической томографии в районе Ключевской группы вулканов на Камчатке за 2004 г., по данным И. Ю. Кулакова (ИНГГ СО РАН)

Все алгоритмы тестировались на реальных данных.

Данная работа открывает новые возможности по визуальному анализу геофизических данных. Комплексная визуализация сейсмических данных, связанных с вулканической активностью, может быть дополнена показом геологических моделей (границы тектонических плит, структуры очага и каналов) и анимацией извержений. Движение магмы к земной поверхности, сопровождается роями землетрясений, изменениями скоростей

распространения сейсмических волн под вулканическим комплексом. Согласованный показ всех этих данных дает возможность комплексного анализа динамики процесса.

Таким образом, было разработано приложение для визуализации различных видов сейсмических данных и сейсмических явлений на базе виртуального глобуса. Приложение использует свободную библиотеку osgEarth для генерации и рендеринга самого глобуса на основе геопривязанных изображений. Были внесены изменения в код osgEarth для поддержки прозрачного рельефа и переключения различных режимов отображения глобуса во время работы приложения (атмосфера, растяжение по высоте, отключение текстур). Были протестированы региональные и мировые каталоги землетрясений, содержащие до 1 миллиона событий. Разработаны средства поддержки для показа зон субдукции, выделения объемных зон землетрясений с типичными тектоническими характеристиками, границ тектонических плит. Реализована визуализация данных сейсмотомографии с тестированием на примере района Ключевской группы вулканов с помощью прямого объемного рендеринга. Реализована визуализация геологических моделей и анимации. Поддержана стереоскопическая визуализация.

Отображение разных видов сейсмических данных в едином контексте на базе глобуса позволяет анализировать зависимости между данными. При этом оказалось очень важным использование стереоскопического режима просмотра виртуального глобуса. Стереоскопический режим позволяет визуально отделить группы гипоцентров между собой, отделить подземные объекты от объектов, расположенных на поверхности Земли.

Разработанное приложение в 2012-2014 гг. успешно использовалось для демонстрации результатов геофизических исследований на постоянно действующей выставке РАН (ПДВ РАН).

3.4 Выводы по главе 3

В задаче представления виртуальных 3D-моделей и связанной с ними информации пользователям можно выделить два основных вопроса: методический и технический.

С методической точки зрения, основной задачей разработчика является синтетическое представление информации, т.е. представление больших массивов разнородных данных в форме (или на основе) визуально осмысленных 3D-моделей, в том числе с применением игровых элементов. Благодаря этому достигается гармоничная активизация левополушарного (логического) и правополушарного (ассоциативного) мышления и лучшее понимание (восприятие) информации. При этом применяются методы и подходы виртуальной реальности (virtual reality, virtual environment), интерактивного повествования (interactive storytelling), ситуационной осведомленности (situational awareness), неогеографии (neogeography), а также тесно связанные с ним методы и технологии совмещения развлечения и образования («edutainment» = «education» + «entertainment»), современным воплощением которых являются «серьезные игры» (serious games).

С технологической точки зрения, для обеспечения доступа к виртуальным 3D-моделям (3D-документам) и их коллекциям (наборам) могут применяться два подхода: индивидуализированный или массовый. Индивидуализированный подход предполагает использование стационарного или мобильного программно-аппаратного комплекса, как правило с большим экраном, зачастую с поддержкой специфических функций отображения (например, стерео) или взаимодействия (сенсорные экраны, манипуляторы). Массовый подход предполагает создание автономного программного продукта, который можно установить на пользовательском компьютере, либо создание веб-приложения, предназначенного для просмотра в браузере. Наиболее массовый доступ к 3D-моделям может быть обеспечен за счет создания веб-приложения, не требующего установки плагина.

Разработаны методы и технологии создания интерактивных 3D-приложений для представления и популяризации виртуальных 3D-моделей. Представлен ряд примеров интерактивных 3D-приложений, разработанных автором совместно с коллегами для представления и популяризации созданных виртуальных 3D-моделей объектов истории науки и техники. Разработаны как 3D-приложения с поддержкой стерео-режима для систем виртуальной реальности (воплощающие индивидуализированный подход), так и 3D-приложения со свободным веб-доступом, основанные на современных технологиях визуализации трехмерной графики в браузере, таких как Unity 3D и WebGL (воплощающие массовый подход).

На ряде примеров показано, что виртуальное 3D-моделирование является эффективным средством популяризации истории науки и техники. Виртуальные 3D-модели технических и природных объектов могут применяться для создания интерактивных 3D-демонстраций, реализующих принцип совмещения развлечения и образования (эдьютейнмент) — как для систем виртуальной реальности, основанных на стереоскопической визуализации, так и для массового доступа через сеть Интернет.

В работе показано, что виртуальный глобус — цифровая трехмерная модель Земли — является эффективным средством представления виртуальных 3D-моделей крупномасштабных объектов и процессов, связанных с историей науки и техники. Приведены примеры успешного применения виртуального глобуса для представления крупномасштабных технических и природных объектов, расположенных на поверхности Земли, а также для визуализации виртуальных 3D-моделей крупномасштабных природных процессов под поверхностью земли и для визуализации виртуальных 3D-моделей технических объектов, крупномасштабных комплексов и систем в околоземном пространстве.

Глава 4. РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ВИРТУАЛЬНОГО МУЗЕЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ

4.1 3D-модель как документ нового типа: 3D-документ

В последнее время все более широкое распространение в науке, технике, медицине получает новый тип электронных документов: цифровые трехмерные образы объектов (цифровые 3D-модели). Конструкторская документация в современных системах автоматизированного проектирования (САПР) может проходить весь свой жизненный цикл (создание, утверждение, передачу в производство, архивацию для длительного хранения) в цифровом 3D-формате, без вывода комплекта бумажных документов. В строительстве все шире внедряется технология BIM (Building Information Modeling, «информационное моделирование зданий») – управление информацией об объекте (здании, сооружении) на всех этапах его жизненного цикла в рамках единой электронной информационной системы, основанной на трехмерной цифровой модели этого объекта [Eastman et al., 2011]. Подходы к обработке, хранению, комплексному анализу трехмерных образов активно развиваются в медицине (в связи с развитием методов и технологий компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии). Большое количество цифровых трехмерных данных генерируется (регистрируется) в различных областях науки, прежде всего, молекулярной биологии, химии, материаловедении, сейсмологии.

ГОСТ Р 51141 98 «Делопроизводство и архивное дело. Термины и определения» определяет документ как *«зафиксированную на материальном носителе информацию с реквизитами, позволяющими ее идентифицировать»*. Таким образом, цифровая трехмерная модель может рассматриваться как новый тип документа – 3D-документ [Леонов, Батулин, 2013]. Четкое определение понятия «3D-документ» будет дано в следующем разделе данной главы. Пока отметим лишь его важнейшую отличительную черту: в 3D-документе пространственная информация о геометрии и

структуре объекта хранится в некоторой трехмерной системе координат, связанной с объектом. В этом состоит качественное отличие 3D-документа от рисунков, схем, чертежей, фото- и кинодокументов, которые сохраняют двумерные изображения объекта.

Трехмерные документы создаются (генерируются) в мире в постоянно возрастающих масштабах. Все более массовому созданию трехмерных образов реальных объектов способствует стремительное развитие сенсоров, регистрирующих первичные данные (в том числе, лазерных сканеров и фотоаппаратов), а также развитие персональной компьютерной техники и программного обеспечения, которые позволяют эффективно обрабатывать массивы этих первичных данных. Широко создаются также трехмерные образы несуществующих объектов: например, проектируемых, или утраченных и воссозданных в цифровом виде по сохранившимся данным (виртуальная реконструкция). В том числе, создаются модели рукотворных и природных объектов, представляющих общественную ценность – от памятников культуры и природы до иных видов национального или мирового достояния. Во многих странах мира данная работа имеет форму систематических программ, долгосрочных регулярных инициатив.

Некоторые технологии создания трехмерных образов сегодня, по сути, стали бытовыми. Например, создание простой 3D-модели на основе набора фотографий методами фотограмметрии сегодня может быть выполнено на персональном компьютере с использованием бесплатного (или недорогого) программного обеспечения, не требующего специальных знаний. Этим пользуются, например, некоторые археологи для фиксации раскопов. Аналогичные технологии реализованы в виде программного обеспечения для смартфонов, и применяются, например, риелторами или дизайнерами интерьера для быстрой 3D-визуализации объекта недвижимости. Программное обеспечение SketchUp уже около десяти лет в массовом порядке используется для моделирования городской застройки на

виртуальном глобусе Google Earth; оно доступно для освоения буквально школьнику.

Таким образом, подчеркнем, что возникновение 3D-документов связано с развитием технологий лазерного сканирования, фотограмметрии, томографии, трехмерного моделирования. Широкое распространение соответствующего оборудования и программного обеспечения позволило создавать точные, детальные цифровые копии объектов, сохраняющие информацию о геометрии (топологии) и пространственной ориентации объектов, их внешнем виде, внутренней структуре (элементах, связях), особенностях материалов, динамике во времени. 3D-технологии на рубеже XX–XXI вв. произвели настоящую революцию в области сохранения (фиксации) информации об объектах, подобную той, которая произошла веком ранее в связи с изобретением фотографии, синематографа и звукозаписи.

Именно развитие технических средств фиксации пространственной информации об объектах привело к появлению нового типа научно-технической документации — 3D-документа. Ведь с технической точки зрения, документ – это информация, зафиксированная на материальном носителе. Появление новых способов фиксации информации приводит к появлению нового типа документов: так, в начале XX века появились фото-, фоно-, кинодокументы. В начале XXI века получил широкое распространение целый комплекс методов, позволяющих сохранять информацию об объектах в форме цифровых 3D-моделей, что привело к появлению нового типа научно-технической документации: 3D-документа. В научной литературе понятие 3D-документа появилось не позже 2007 года [Fellner et al., 2007].

4.1.1 Структура и отображение 3D-документов

Простейшим примером 3D-документа является модель в виде трехмерного облака точек, полученная в результате лазерного сканирования

объекта (point cloud) – трехмерная точечная модель, или «облако точек». На основе этого облака точек может быть построена трехмерная полигональная модель объекта (mesh), трехмерная твердотельная модель (solid). Также 3D-документ может быть создан при помощи методов фотограмметрии (построение 3D-модели объекта по его двумерным изображениям с разных ракурсов), томографии (построение 3D-модели внутренней структуры объекта по его послойным сечениям), в результате 3D-моделирования по чертежам и др.

Информация о геометрии объекта может храниться в виде точечной или полигональной модели. Например, результатом лазерного сканирования является облако точек: текстовый файл, каждая строка которого определяет положение одной точки в пространстве (координаты x , y , z в некоторой системе координат), а также, возможно, дополнительную информацию, связанную с этой точкой (например, ее цвет). Если с помощью компьютера изобразить эти точки одновременно в трехмерном пространстве, они «оконтурят» поверхность объекта, и зритель увидит на экране виртуальную точечную 3D-модель объекта. Геометрическая точность такой модели может быть очень велика, составляя тысячные доли процента от размеров объекта. В то же время, точечная модель не обеспечивает фотореалистичной визуализации и не удобна для анализа, поэтому на ее основе могут строиться полигональные 3D-модели, в том числе текстурированные, с сохранением геометрической точности или с разной степенью огрубления. В полигональной модели поверхность объекта задается набором многоугольников (полигонов), обычно треугольников.

Структура объекта может быть представлена как в виде геометрии составляющих его элементов, так и в виде непрерывного распределения некоторого параметра (например, плотности). В последнем случае для хранения информации может применяться трехмерная матрица значений, в каждой ячейке которой задано значение параметра.

Виртуальная 3D-модель позволяет зафиксировать и сохранить качественно больший объем информации о пространственных характеристиках объекта, чем текстовое описание, рисунок (схема), фото- и киносъемка. Особенно ярко это преимущество проявляется для крупных объектов со сложной геометрией и пространственной структурой. Поэтому цифровые 3D-модели находят все более широкое применение, в том числе, в задачах научно-технической документации.

Цифровой 3D-документ может содержать информацию о геометрии (топологии) и пространственной ориентации объекта, его внешнем виде, внутренней структуре (элементах, связях), особенностях материалов, динамике во времени и др.

Важно подчеркнуть, что 3D-модель может использоваться не только как способ визуализации образа объекта, но и как удобный трехмерный интерфейс для доступа к базе данных с информацией об объекте. Как и любой электронный документ, 3D-документ может быть связан взаимными ссылками с другими электронными документами – текстами, изображениями, видеозаписями, которые имеют отношение к рассматриваемому объекту. Вся эта информация может быть сохранена в базах данных или файловых системах, как локальных, так и интернет-доступом. Под 3D-документом часто понимается не только непосредственно 3D-модель объекта, но и весь массив информации, представленный на ее основе, а также программное обеспечение для просмотра и взаимодействия с этой 3D-моделью и связанной с ней информацией. При этом необходимо понимать, что именно наличие трехмерной системы координат, к которой привязана информация, отличает 3D-документ от других типов документов.

Для отображения цифровой 3D-модели объекта на экране компьютера и манипуляций с ней используется соответствующее программное обеспечение — как и для любых других электронных документов. Существуют стандартные форматы 3D-моделей, просмотр которых поддерживается многими свободно доступными программными средствами.

Развитый 3D-документ, включающий в себя набор взаимосвязанных 3D-моделей и связанную с ними дополнительную информацию, может требовать специализированного инструментария для просмотра. Однако такой 3D-документ может быть интегрирован с инструментарием его просмотра в единое пользовательское приложение (программу, которую пользователь устанавливает на свой компьютер) или веб-приложение (для просмотра через браузер). Таким образом, использование 3D-документов на сегодняшний день практически не ограничивается возможностями современных персональных компьютеров, и связано лишь с теми техническими и правовыми решениями, которые принимают их авторы (производители).

4.1.2 Восприятие 3D-документа

Основная информация из рисунка ли, из фотографии, из чертежа или виртуальной модели поступает через зрение. Несколько огрубляя ситуацию, будем говорить, что глаз — это часть мозга, имеющая выход вне черепной коробки. Именно мозг создает (или воссоздает) внешний мир (объективную реальность) в виде некоторого представления о нем, причем отсутствующие или не увиденные детали, будут включены в это представление самим мозгом [Хакен, Хакен-Крелль, 2002, с. 237]. То, что мы «видим» посредством сложной физики формирования визуального образа, далеко выходит за пределы оптических способностей наших глаз: световые узоры (паттерны) на сетчатке (детекторе света) мозг перерабатывает в представления об объектах [Грегори, 2003, с. 42-43].

Двумерный (2D) рисунок состоит из линий, мазков, цветовых пятен, но они дают мозгу представление об изображенном трехмерном (3D) объекте. Инженеры умеют «читать» чертежи и даже радиоэлектронные схемы, весьма далекие от внешнего образа объекта — результат работы мозга в чистом виде. Фотография, безусловно, дает более точную картину, чем схема или картина художника, но менее интересна. Для фотографии все детали равнозначны, художник же может что-то выделить, обратить внимание

исследователя на ту или иную деталь. В кинодокументах двойное движение оптических систем — глаз и объектива — позволяет дать более адекватное представление о глубине пространства [Арнхейм, 1974, с. 266]. Стереоскопическая киносъемка обеспечивает еще более реалистичное представление об объекте за счет фиксации двух различных изображений, соответствующих левому и правому глазам наблюдателя.

Формат 3D-документа позволяет зафиксировать намного более полную информацию о геометрии, структуре и внешнем виде объекта, чем набор чертежей или фото/кинодокументов. Более того, 3D документ позволяет пользователю самостоятельно «исследовать» объект: рассматривать 3D-модель в разных ракурсах, менять параметры отображения, изучать связанную с визуальным образом дополнительную информацию. 3D-документ может отображаться на экране как в моно-, так и в стереорежиме.

Наибольший эффект «погружения» обеспечивается при интерактивном стереоскопическом режиме отображения, когда пользователь может свободно перемещаться в виртуальном пространстве модели и взаимодействовать с ней подобно взаимодействию с реальным объектом (технология «виртуальной реальности»). При создании и восприятии виртуальной модели зрительная система пользователя работает не с рисунками, чертежами, фотографиями, а с 3D-моделью в виртуальном пространстве. Поэтому роль мускульных усилий, помогающих нам воспринимать третье измерение, возрастает по сравнению со зрительными ощущениями восприятия первого и второго измерения. При этом мускульные усилия глаз механически отличаются от усилий, привычных в реальном мире. Поэтому перед тем, как мы начинаем рассматривать 3D-документ в стерео режиме, в течение нескольких десятков секунд (меньше минуты) требуется некоторая «настройка» глаз. Отметим, что характер искажений (модификаций), которые вносит мозг в восприятие виртуальных моделей при стереорежиме их отображения, пока не изучен [Батурин, 2012].

4.1.3 Типы 3D-документов

Можно выделить несколько типов трехмерных образов (3D-документов): первичные данные, метрически точная документация, рисунок, см. табл. [Леонов, 2015д], [Леонов, 2016]. Способы создания и сферы применения этих трехмерных образов различаются, но в исторической перспективе все они могут стать важными источниками историко-технической информации. Каждому типу трехмерного образа можно поставить в соответствие аналогичный ему по способу создания и сферам применения двумерный образ.

К первому типу образов относятся первичные данные, полученные с использованием сенсоров разных типов. Это трехмерные точечные модели, созданные в результате лазерного сканирования либо обработки массивов двумерных изображений, используемые в первую очередь для объективной фиксации информации о состоянии объекта. Двумерным аналогом этого типа трехмерных образов является фотография.

Второй тип – метрически точные образы, соответствующие определенным стандартам (нормативам), используемые для создания и обслуживания технических объектов (например, конструкторская документация в трехмерном формате). Двумерным аналогом этого типа трехмерных образов является чертеж.

Третий тип – всевозможные трехмерные рисунки, не обладающие стандартизированной метрической точностью, и используемые для визуализации тех или иных элементов или характерных черт объекта, обычно на качественном уровне. Двумерным аналогом этого типа трехмерных образов является обычный рисунок, набросок, который, тем не менее, со временем может стать ценным научно-техническим источником, рисунок 4.1.

Таблица. Типы трехмерных документов

Тип 3D-документа	Способ создания	Описание	Применение
Трехмерная точечная или воксельная модель (первичные данные)	<p>Автоматическая регистрация образа объекта с использованием соответствующих технических средств (приборов)</p> <p><i>(Двумерный аналог: фотография)</i></p>	<p>Трехмерная точечная модель, созданная в результате лазерного сканирования или фотограмметрической обработки набора двумерных изображений;</p> <p>трехмерная воксельная модель, созданная методами томографии</p>	<p>Объективная инструментальная фиксация состояния объекта, а также основа для ручного или полуавтоматического создания производных двумерных и трехмерных образов</p>
Трехмерная научно-техническая документация	<p>Ручное или полуавтоматическое создание образа объекта с соблюдением стандартов оформления и требований к метрической точности</p> <p><i>(Двумерный аналог: чертеж)</i></p>	<p>Метрически точная трехмерная модель (полигональная или твердотельная), созданная, как правило, в системе автоматизированного проектирования (САПР)</p>	<p>Основа для создания (строительства, производства), обслуживания (эксплуатации, ремонта), развития (модернизации), документирования технического объекта – например, в рамках концепции BIM</p>
Трехмерный рисунок (набросок)	<p>Ручное создание образа объекта без соблюдения стандартов оформления и требований к метрической точности</p> <p><i>(Двумерный аналог: рисунок)</i></p>	<p>Трехмерная модель произвольного формата, созданная с использованием любого подходящего программного обеспечения</p>	<p>3D-моделирование отдельных черт или элементов объекта на качественном уровне, в том числе для решения отдельных задач его проектирования, обслуживания, развития, документирования, визуализации, изучения</p>

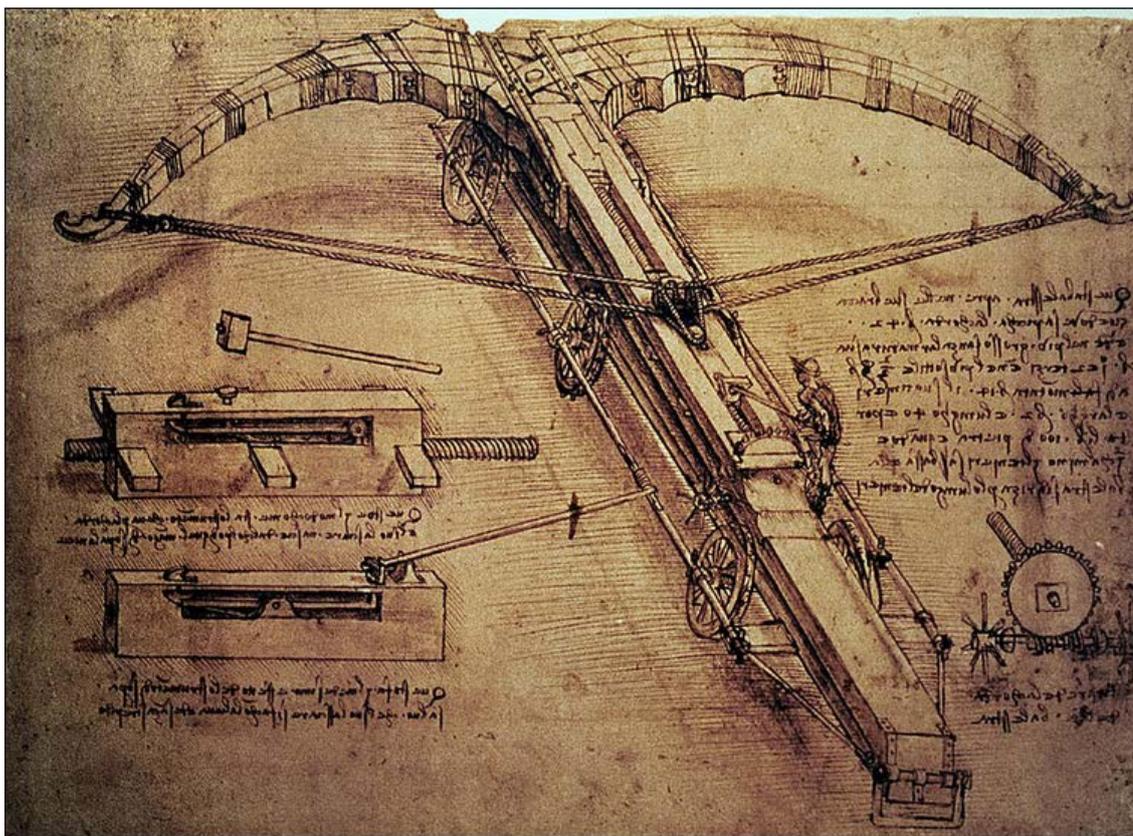


Рисунок 4.1 — Гигантская катапульта. Леонардо да Винчи, 1499 г.

4.1.4 Актуальность применения 3D-документов

Одна из задач истории науки и техники – фиксация информации об исследуемых объектах, их документирование. Важную роль здесь играет фиксация внешнего вида объекта. Для этого в истории науки и техники традиционно используются различные способы, начиная с рисунков экспедиционных художников [М. В. Ломоносов..., 2011, с. 8], проходивших специальное обучение, включая карты-чертежи [Хорографическая чертежная книга..., 2011], географические карты, чертежи и схемы, до фото- и кино/видеосъемок, в том числе стереоскопических.

Фото-, кино- и фонодокументы давно являются общепризнанными типами научно-технической документации, наряду с традиционными «бумажными» документами. По мере развития компьютерных технологий, все большее распространение получают электронные документы – тексты, изображения, аудио- и видеозаписи, сохраненные в форме цифровых

электронных файлов. Все эти типы документов хорошо известны современным специалистам в сфере документоведения и архивоведения.

Развитие технологий лазерного сканирования, фотограмметрии, трехмерного моделирования сегодня позволяет широко применять еще один способ фиксации информации об объектах: создание электронной трехмерной (3D) модели объекта, его 3D-документирование. Цифровая 3D-модель может содержать информацию о геометрии объекта, его внешнем виде, внутренней структуре, динамике во времени. Кроме того, виртуальная 3D-модель объекта может быть связана посредством взаимных ссылок с другими типами электронных документов – текстовыми, графическими, видео- файлами, сохраненными в базах данных или файловых системах, в том числе на удаленных серверах, доступных через интернет.

По сути, 3D-документ – это форма организации информации, предназначенная для представления пользователю визуального образа (3D-модели) объекта или процесса, а также разнообразной дополнительной информации на основе этого визуального образа.

Важно подчеркнуть, что ни один из перечисленных способов фиксации информации об объектах не отменяет предыдущие, а дополняет их. Действительно, каждый из них имеет свои преимущества перед другими, но и свои недостатки. Поэтому на практике необходимо применять все доступные способы закрепления информации об объекте.

Важность трехмерной фиксации информации о существующих памятниках техники и архитектуры, особенно находящихся под угрозой разрушения, также как и важность сохранения 3D-документов как историко-технических источников, к сожалению, осознается очень медленно. Первичная трехмерная информация, особенно получаемая коммерческими компаниями, зачастую не сохраняется исполнителем работ после их завершения, либо оказывается недоступной для изучения. Государственные и ведомственные архивы по большей части без энтузиазма относятся к задаче хранения первичных трехмерных данных, поскольку с этим связаны

объективные технические и методические сложности. Объем таких данных может составлять десятки гигабайт, а их воспроизведение требует закупки специальной компьютерной техники и программного обеспечения. В результате, даже уже полученная ценная трехмерная информация об уникальных объектах нередко теряется, не сохраняется для будущих поколений.

Отметим, что аналогичная ситуация наблюдалась около ста лет назад с кинофотофонодокументами (КФФД), и по-видимому является типичной для начального этапа освоения нового типа документов. Как отмечал В. М. Магидов: *«...государственное хранение КФФД как документальных свидетельств эпохи стало обеспечиваться только во второй половине 1920-х гг.... мы сталкиваемся с многочисленными примерами утраты ценных кинофотокадров и фрагментов радио- и телепередач и целых произведений... Нельзя не учитывать также сложности взаимоотношений между государственными и ведомственными архивами... В результате в отечественных архивах отсутствуют полные комплекты кинофонодокументов; большая часть КФФД не сохранилась в полном объеме, в оригинале и в первоначальном монтаже»* [Магидов, 1993].

Здесь уместно привести две исторические аналогии.

В конце XIX в. был изобретен и получил широкое распространение фонограф – устройство для записи голоса на восковые валики. Ценность получаемых фонограмм как исторического аудио-документа была осознана практически сразу же.

«Почему бы не завести – при одном из музеев, либо и самостоятельно – музей фонограмм? Там собирались бы произношения ораторов, писателей и вообще интересных людей, чтобы сохранить их «на века». Как интересно было бы услышать живое слово людей спустя десятки, даже сотни лет после них! Итак, я ставлю вопрос – об учреждении музея (даже нескольких музеев – в столицах и провинции) фонограмм. Этим установится живая связь между прошедшим, настоящим и грядущим...» [Бороздин, 1899].

Однако на практике запись голосов выдающихся людей долгое время выполнялась далеко не систематически, силами отдельных энтузиастов. Только в 1918 г. в Петрограде был создан Институт живого слова, где в Кабинете изучения художественной речи под руководством С. И. Бернштейна стала вестись систематическая работа по записи на фонограф голоса писателей, поэтов, актеров, включая А. Ахматову, А. Блока, Н. Гумилева, С. Есенина, В. Маяковского и многих других [Шилов, 2004].

На рубеже XIX–XX вв. родилась еще одна, передовая на тот момент технология фиксации информации об объектах – цветная фотография. Пионером в разработке технологии передачи изображения в истинных цветах в России стал всемирно известный сегодня С. М. Прокудин-Горский – химик, изобретатель и фотограф-энтузиаст. Первые его снимки датируются 1903 г. В 1909–1916 гг. при государственной поддержке он объехал значительную часть территории страны и сделал тысячи цветных фотоснимков. Основная часть этой коллекции с 1948 г. хранится в Библиотеке Конгресса США; в начале 2000-х гг. эти снимки были отреставрированы, оцифрованы и сегодня доступны в электронном виде всем желающим. Значение фотографий Прокудина-Горского сложно переоценить: только благодаря ему мы можем сегодня увидеть впечатляющий документальный цветной портрет Российской империи начала XX в. Его работы имели и сугубо практическое применение: например, фотографии ваз из коллекции Эрмитажа использовались впоследствии при реставрации утраченного цвета.

Современные технологии фиксации информации об объектах – такие как цифровое 3D-моделирование объектов на основе фотограмметрии и лазерного сканирования, или цифровая стереоскопическая видеосъемка – находятся сегодня в том же положении, что и цветная фотография или запись фонограмм в начале XX в. С одной стороны, происходит стремительное совершенствование технологий и оборудования, благодаря чему появляется возможность их массового применения. С другой, – высокая стоимость оборудования и особенно обработки данных не позволяет выполнять

крупные проекты без финансовой поддержки. Такую поддержку в порядке эксперимента получают отдельные проекты, инициированные в основном энтузиастами; полученные ими результаты привлекают широкое внимание и постепенно получают признание традиционных музеев и архивов. В то же время, внедрение новых технологий в целом идет медленно, и важность тех данных, которые сегодня можно сохранить за счет применения новых методов, осознается в полной мере далеко не сразу.

Например, в 2011 г. сотрудниками ИИЕТ РАН была выполнена стереоскопическая видеосъемка гейзеров, источников и других объектов в Долине гейзеров на Камчатке [Алейников и др., 2011]. В 2007 г. в этом районе произошел крупный оползень, в результате чего многие достопримечательности оказались завалены или затоплены. Специалисты сразу же указали на возможность повторения подобных событий в будущем и практическую невозможность их предотвращения. Таким образом, задача сохранения информации о сохранившихся объектах приобрела несомненную актуальность. Первая попытка стереосъемки в Долине гейзеров была предпринята в 2009 г. с использованием двух обычных видеокамер и любительской стерео 3D-риги (т.е. каркаса для крепления видеокамер с возможностью регулировки стереобазы и направления осей). К сожалению, полученный в 2009 г. видеоматериал оказался большей частью неудовлетворительным по качеству. Лишь в 2011 г. появились доступные по цене модели двухматричных стерео видеокамер (Sony HDR-TD10E и JVC GS-TD1), последняя из которых была сразу же закуплена ИИЕТ РАН и уже в августе 2011 г. использована для выполнения съемок на территории Кроноцкого заповедника. В Долине гейзеров и кальдере вулкана Узон было отснято более 7 часов материала, на основе которого смонтировано 25 стерео-видеофильмов о наиболее примечательных объектах в формате Stereo FullHD 1920x1080 с частотой 50 кадров в секунду. Фильмы выложены в общем доступе в сети Интернет (<http://valleyofgeysers.com/videos>) и доступны для просмотра всем желающим.

В начале 2014 г. в районе Долины гейзеров произошел новый оползень и прошел селевой поток, затронувший многие объекты и заметно изменивший внешний вид территории [Леонов, 2014ж]. В результате этой природной катастрофы, в частности, был завален и прекратил работу гейзер Горизонтальный, сократилась до 1-2 м высота извержения гейзера Великан, лишился своей постройки гейзер Жемчужный... Объекты, зафиксированные в созданных нами фильмах, в 2014 г. по большей части прекратили свое существование либо заметно изменили внешний вид или режим работы. Таким образом, эти фильмы уже сегодня являются ценным историческим стерео-видео документом. По съемкам можно восстановить прежние характеристики объектов (например, высоту, периодичность, характер извержения гейзеров), что может пригодиться будущим исследователям.

Другой пример – проект по 3D-документированию Шуховской башни на Шаболовке, выполненный в ИИЕТ РАН в 2011-2013 гг. [Аникушкин, Леонов, 2013], [Leonov et al., 2015]. Мотивация этой работы была обусловлена удручающим техническим состоянием башни, а также анонсированными планами ее реконструкции-реставрации. В рамках проекта было выполнено лазерное сканирование и 3D-моделирование башни, которые позволили с высокой точностью зафиксировать ее геометрию и визуализировать конструкцию соединительных узлов. Таким образом, была создана основа как для независимой оценки результатов реконструкции-реставрации, так и для восстановления башни в случае неожиданной аварии.

Реконструкция-реставрация, запланированная на 2011-2013 гг., так и не была проведена: смета проекта значительно превысила объем выделенных средств и не прошла согласование Главгосэкспертизы. А в начале 2014 г. Минкомсвязи РФ выступило с предложением срочно демонтировать башню в связи с опасностью обрушения («Известия», 4 февраля 2014 г.: <http://izvestia.ru/news/565094>).

На заседании правительственной комиссии по телерадиовещанию 25 февраля было принято решение о демонтаже и переносе башни («Известия»,

27 февраля 2014 г.: <http://izvestia.ru/news/566666>). 7 марта на общественное обсуждение был представлен проект постановления Правительства РФ о демонтаже башни и восстановлении ее на новом месте в пределах города Москвы *«в объемах и пропорциях, повторяющих аналогичное сооружение, созданное в 1922 году»*.

Инициатива Минкомсвязи РФ вызвала волну общественного протеста. Эксперты ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, в чьем ведении башня находилась до начала 2000-х гг., не были допущены к экспертизе, а сам отчет о выполненной экспертизе не доступен общественности. В связи с этим выводы об опасности обрушения башни представляются необоснованными. Более того, есть основания предполагать коммерческую заинтересованность в «избавлении» от башни, т.к. это откроет возможность постройки высотного здания с использованием освободившегося земельного участка и части прилегающей территории, которая уже находится в частной собственности.

По мнению экспертов ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова и других специалистов, опасности обрушения башни на сегодняшний день нет, и возможна ее реставрация на месте. Демонтаж же башни по предлагаемому плану фактически означает ее уничтожение. Конструкция не предполагает возможность ее сборки-разборки; при демонтаже башни ее корректная сборка в будущем практически невозможна. Кроме того, «новодел», если он и будет построен, уже не будет являться памятником. «Перенос» башни полностью исключит возможность ее включения в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Открытые письма в защиту башни подписали многие известные российские и зарубежные архитекторы.

Активный общественный протест заставил Правительство РФ пересмотреть свои планы и фактически отменить скандальное постановление о «переносе» башни. Однако проблема нормализации ее технического состояния и будущего использования до сих пор остается не решенной, таким образом, дальнейшая судьба башни не ясна.

Ситуация, сложившаяся с Шуховской башней на Шаболовке, наглядно демонстрирует возможность утери даже важнейших, «знаковых» для государства и общества памятников техники — как в результате объективного ухудшения технического состояния, так и из-за необдуманных решений чиновников. Это дополнительно подтверждает важность 3D-документирования памятников, которые находятся под угрозой разрушения.

Можно надеяться, что развитие материально-технической базы отечественных архивов, приход молодых специалистов, владеющих теорией и практикой работы с технотронной документацией, в том числе трехмерной, постепенно приведет к расширению комплектования архивов трехмерными электронными документами, а также к их историографическому, архивоведческому и источниковедческому освоению.

4.1.5 3D-документ как историко-технический источник

В историко-научных, историко-технических исследованиях под *источниками* традиционно понимаются как документы (письменные памятники, рисунки), так и предметы материальной культуры (напр., музейные экспонаты), на основе которых строится научное исследование. Одним из первых проблемы источниковедения в истории техники рассматривал С. В. Шухардин [Шухардин, 1961].

Исторически, для сохранения текстов и рисунков использовались разнообразные способы фиксации информации на различных носителях. Принципиальный шаг вперед был сделан в XIX веке с изобретением фотографии, которая обеспечила возможность объективной фиксации изображения, полученного оптической системой, и фонографа, позволившего зафиксировать звук. Дальнейшее развитие техники в рамках этих идей привело к появлению киносъемки, которая по существу является динамической фотографией с синхронным звуком (включая одновременную запись изображения с нескольких разных точек, частным случаем которой является стереокино). Массовое использование фотографии, звукозаписи и

киносъемки для сохранения информации привело к появлению понятий фото-, фоно- и кинодокументов.

В конце XIX – начале XX вв. с изобретением фотографии, фонографа и кинематографа появился новый тип неписанных документов: фото, фоно, кинодокументы, объем которых с тех пор постоянно возрастает. Кинофотофонодокументы как исторический источник исследовались в работах А.А. Кузина [Кузин, 1960], Е.М. Евграфова [Евграфов, 1973], В.М. Магидова [Магидов, 1986] и др.

Компьютерная революция конца XX в. привела к широкому использованию электронных цифровых документов, созданию систем электронного документооборота (Electronic Document Management System, EDMS), в основе которых изначально лежали технологии обработки электронных изображений [Green, 1993]. В современном обществе многие документы, в том числе связанные с развитием науки и техники (например, конструкторская документация, рабочая переписка), изначально создаются в электронной форме, и существуют в дальнейшем только (или преимущественно) в электронной форме. Таким образом, со временем электронные документы составляют все больший пласт источников в сфере истории науки и техники.

Сегодня мы являемся свидетелями очередного качественного продвижения: все шире применяются технологии фиксации информации об объектах в виде виртуальных (цифровых) 3D моделей. К таким технологиям относятся, прежде всего, лазерное сканирование, фотограмметрия, различные виды томографии, а также 3D моделирование. Виртуальная 3D модель сохраняет пространственные характеристики объекта (геометрию, текстуру, структуру и другие) в некоторой трехмерной системе координат, связанной с объектом. В этом состоит ее качественное отличие от фото- и киносъемки, сохраняющих двумерные изображения объекта.

В связи с этим неуклонно возрастает важность сохранения и изучения источников, создаваемых с помощью технических средств. Не случайно,

например, в Историко-архивном институте Российского государственного гуманитарного университета (ИАИ РГГУ) еще в 1994 г. был создан факультет технотронных документов и архивов (ФТАД), нацеленный на подготовку специалистов, владеющих теорией и практикой работы с технотронной документацией [Магидов, 2014]. На сайте факультета отмечается, что такие специалисты особенно востребованы в архивах научно-технической документации, *«где хранятся документы поливидового состава (научно-технические, фототелеметрические, машиночитаемые, кино-, фото-, фоно-, видеодокументы)»* (<http://ftad.ru/>).

Важно подчеркнуть, что ни один из перечисленных способов фиксации информации об объектах не отменяет предыдущие, а дополняет их. Действительно, каждый из них имеет свои преимущества перед другими, но и свои недостатки. Поэтому на практике необходимо применять все доступные способы закрепления информации об объекте.

4.1.6 Проблемы внедрения 3D-документов в электронный документооборот

Внедрение 3D-документов в электронный документооборот, практику архивной деятельности идет медленно, поскольку сопряжено с рядом объективных проблем – как при создании, так и при хранении 3D-документа [Леонов, 2014б]. В 2013 г. РГАНТД и Архив РАН впервые приняли на хранение документ нового типа – 3D-документ, созданный в ИИЕТ РАН [РГАНТД, 2013]; но это до сих пор единственный прецедент [Медведев, 2013].

Даже в тех случаях, когда 3D-модель создается, например, в ходе планирования реконструкции объекта или подготовки реставрационных работ, она часто воспринимается как промежуточный этап достижения основной задачи (построения чертежей, выполнения расчетов и т.п.), либо вообще как «игрушка». Понимание ценности полученной трехмерной информации как исторического документа часто отсутствует. Например, нередко ситуация, когда для подготовки проекта реконструкции

(реставрации) памятника архитектуры привлекается подрядчик работ, который выполняет лазерное сканирование объекта, создает комплект чертежей, и после сдачи работ удаляет исходные облака точек со своих компьютеров, т.к. они занимают много места. А заказчик работ не включает в техническое задание требование о передаче исходных облаков точек, потому что не разбирается в технологии работ и не подозревает об их существовании, либо не видит в них практической ценности, либо не имеет программного обеспечения и специалистов для работы с таким типом трехмерных данных. Так теряется ценная, уже полученная и часто уже не восстанавливаемая трехмерная информация об объекте.

Вероятно, было бы целесообразным обсудить возможность принятия закона, обязывающего, например, исполнителей работ по лазерному сканированию и 3D-моделированию объектов культурного и природного наследия (или правообладателей результатов) передавать копию полученных трехмерных данных на хранение в соответствующий государственный архив. Но такая инициатива неизбежно обнаружит технические и организационные сложности уже внутри самого архивного сообщества. На основе каких нормативных документов архив должен принимать, обрабатывать, хранить и выдавать по запросу полученную трехмерную информацию? Как формировать метаданные (реквизиты) 3D-документов? Какие форматы данных допустимы? Где хранить полученные данные? С использованием каких технических средств воспроизводить (показывать) 3D-модели? Как обеспечить соблюдение авторских прав?

Таким образом, полноценное включение 3D-документов в электронный документооборот сегодня сдерживается рядом проблем, среди которых мы выделим основные:

1. Отсутствие нормативной базы, регулирующей работу архивов с 3D-документами. В частности, отсутствие стандарта на реквизиты (метаданные) 3D-документа.

2. Разнообразие форматов 3D-моделей (точечные, твердотельные, параметрические, полигональные модели), а также связанных с ними данных.

3. Большой объем 3D-документов (облака точек могут занимать десятки гигабайт), необходимость организации их надежного хранения.

4. Необходимость использования специального программного инструментария для просмотра 3D-моделей и взаимодействия с ними. Разнообразие программных средств, используемых для различных форматов 3D-документов.

5. Неопределенность правового статуса 3D-документов в российском законодательстве, сочетание в рамках одного 3D-документа элементов с разным правовым статусом.

Важность сохранения трехмерной информации об объектах, получаемой современными методами, исключительно высока. Необходимо по возможности скорее вводить в архивную практику и электронный документооборот использование 3D-документов, одновременно с широким обсуждением и поиском путей решения обозначенных проблем.

В следующем разделе будет подробно рассмотрена первая из обозначенных проблем: отсутствие правовой и нормативной базы, регулирующей работу с 3D-документами.

4.2 Правовой режим 3D-документов

Правовой режим 3D-документа представляет собой слабо разработанную проблему, прежде всего, из-за новизны самого объекта, но вместе с тем, и проблему весьма актуальную для создателей таких документов, а также их держателей и пользователей [Батурин, Леонов, 2017].

В 2011 г. В Институте истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова Российской академии наук (ИИЕТ РАН) был сформирован Центр виртуальной истории науки и техники (расформированный в 2017 году в ходе оптимизации структуры института в рамках реформы РАН),

перед которым была поставлена задача разработки виртуальных интерактивных 3D-моделей памятников науки и техники, и разработчики немедленно столкнулись с рядом трудностей юридического характера [Батурин и др., 2011], [Батурин, Леонов, 2012], [Леонов, Батурин, 2013].

13 ноября 2013 г. произошло редкое событие, сравнимое с первым поступлением на государственное хранение фотографии (историками не зафиксировано) или первого фонодокумента. Впервые в России в государственный архив был официально (по акту) передан 3D-документ: ИИЕТ РАН сдал, а Российский государственный архив научно-технической документации принял 3D-модель знаменитой телевизионной башни инженера В.Г.Шухова на Шаболовке в Москве. Как раз тогда разгорелась нешуточная борьба между сторонниками сноса Шуховской башни и реконструкции ее на новом месте и защитниками башни как выдающегося образца инженерной мысли и памятника техники. Если бы победила первая точка зрения, навсегда была бы утрачена научно-техническая информация о внешнем виде и элементах «шуховской» несущей конструкции, которые до сих пор в значительной степени сохранились в своем исходном виде [Леонов и др., 2013].

В дальнейшем были построены и другие 3D-модели, обладателем 3D-документа стал Архив РАН, сами документы оказались весьма востребованы пользователями и нужными с практической точки зрения [Батурин, 2013], [Леонов и др., 2014], [Leonov et al., 2015].

Между тем, в российском законодательстве об архивном деле нет никакого упоминания о 3D-документах. Например, в Федеральном законе №125-ФЗ «Об архивном деле в Российской Федерации» от 22 октября 2004 г. с последующими изменениями можно обнаружить упоминания кино-фото документов (пп. «ж») и видео- и фонодокументов (пп. «з») в п.4 ст.22, но ни единого признака 3D-документов, появившихся как раз когда в закон стали вносить первые поправки.

Попробуем описать этот документ нового типа и высказать некоторые соображения по поводу законодательного установления его правового режима.

4.2.1 Понятие 3D-документа

Начнем с определения собственно понятия «документ», которое находим в Федеральном законе от 29.12.1994 «Об обязательном экземпляре документов» № 77-ФЗ.

Определение 1. *«Документ — материальный носитель с зафиксированной на нем в любой форме информацией в виде текста, звукозаписи, изображения и (или) их сочетания, который имеет реквизиты, позволяющие его идентифицировать, и предназначен для передачи во времени и пространстве в целях общественного использования и хранения»* (ст.1 № 77-ФЗ в ред. 03.07.2016).

В отличие от закона предшествующего поколения, уже утратившего силу, в Федеральном законе № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» от 27 июля 2006 г. с последующими изменениями не содержится определение понятия «документ». Поэтому будем исходить из пары «Документированная информация» (п.11 ст.2 № 149-ФЗ) и «Архивный документ» (п.2 ст.3 Федерального закона «Об архивном деле в Российской Федерации № 125-ФЗ от 22 октября 2004 г.)

Определение 2. *«Документированная информация – зафиксированная на материальном носителе путем документирования информация с реквизитами, позволяющими определить такую информацию или в установленных законодательством Российской Федерации случаях ее материальный носитель»* (п.11 ст. 2 № 149-ФЗ в ред. 29.06.2015).

Определение 3. *«Архивный документ – материальный носитель с зафиксированной на нем информацией, который имеет реквизиты, позволяющие его идентифицировать, и подлежит хранению в силу*

значимости указанных носителя и информации для граждан, общества и государства» (п.2 ст.3 №125-ФЗ в ред. 4.10.2014).

В определении 1 указаны два важных признака: 1) фиксирование информации на материальном носителе; 2) реквизиты, позволяющие идентифицировать информацию или ее материальный носитель.

В определениях 2 и 3 обнаруживаем сходные признаки: 1) фиксирование информации на материальном носителе; 2) реквизиты, позволяющие идентифицировать материальный носитель.

Определение 4. *«Фиксирование сведений (информации) – получение и закрепление сведений (информации) на бумажных и (или) иных носителях информации» (ст.3 Федерального закона № 115-ФЗ «О противодействии легализации (отмыванию) доходов, полученных преступным путем, и финансированию терроризма» в ред. 21.07.2014).*

Информация, содержащаяся в документе, фиксируется на каком-то материале (бумага, кино- и фотопленка и т.п.), имеющем форму того или иного носителя (лист, карточка, диск и т.п.). Информация фиксируется тем или иным способом записи, требующим наличия материальных средств (краска, чернила, ручка, принтер, фотокамера и т.п.). В этом смысле говорят о материальном носителе. Материальные объекты включают и физические поля (ст.2 Закона РФ № 5485-1 «О государственной тайне» в ред. 08.03.2015).

Встречаются две категории реквизитов – позволяющие идентифицировать информацию (ГОСТ 351141-98; ГОСТ Р 51141-98) и идентифицировать носитель (см., например, ст. 12 Закона РФ № 5485-1 «О государственной тайне» в ред. 08.03.2015; ст.1 № 77-ФЗ «Об обязательном экземпляре документов» в ред. 03.07.2016).

Определение 5. *Состав реквизитов документа – совокупность реквизитов, позволяющих идентифицировать информацию, содержащуюся в документе, и/или носитель информации, и составляющих часть документа.*

Из сопоставления легальных определений 1 – 5 устанавливаем понимание, из которого исходил законодатель:

Определение 6. *Документирование – фиксирование информации на материальном носителе.*

Информация может быть зафиксирована в виде, доступном для непосредственного восприятия человеком (например, написана, напечатана, нарисована на бумаге), либо в виде, требующем некоторого преобразования, чтобы стать доступным для непосредственного восприятия. Такое преобразование может сделано с помощью аналоговой электронной техники (например, для информации на магнитной ленте – такой, как аудио-, видеокассеты в формате VHS, Betacam) или цифровой электронной техники (ЭВМ).

Определение 7. *Документ – зафиксированная на материальном носителе информация с определенным составом реквизитов.*

Это определение не накладывает никаких ограничений на способ восприятия информации человеком – оно может быть непосредственным или опосредованным техникой.

Теперь мы можем обсудить определение электронного документа, которое находим в Федеральном законе «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».

Определение 8. *«Электронный документ – документированная информация, представленная в электронной форме, то есть в виде, пригодном для восприятия человеком с использованием электронных вычислительных машин, а также для передачи по информационно-телекоммуникационным сетям или обработки в информационных системах» (п.11.1 N 149-ФЗ в ред. 29.06.2015).*

Видно, что электронным документом в смысле определения 8 может быть как цифровая копия документа, предназначенного для непосредственного восприятия (например, оцифрованный бумажный документ), или цифровая копия документа на аналоговом носителе (оцифрованная звуковая дорожка с аудиокассеты), так и документ, не имеющий подобия среди документов указанных выше способов фиксации

(например, файл цифровой 3D-модели, который может быть обработан ЭВМ и преобразован в картинку на экране монитора; или файл с информацией о тактильном воздействии – который может быть обработан ЭВМ и преобразован в механические движения миниатюрных вибромоторов в перчатках виртуальной реальности с тактильной обратной связью), включая даже те виды документированной в цифровом электронном виде информации, которых сейчас еще не существует.

Сузим понятие электронного документа, имея под ним в виду фиксирование информации только в виде электронного цифрового файла. Для представления такого электронного цифрового файла человеку (т.е. вывода изображения на экран, вывода звука на микрофон и т.д.) нужна ЭВМ, снабженная соответствующими устройствами вывода (экран, микрофон и т.д.). Строго говоря, в цифровой форме можно записать также запахи, вкусы и тактильные ощущения, но соответствующие устройства вывода пока не популярны.

Сформулируем определение понятия «электронный документ» в узком, указанном выше понимании, и операциональное (в смысле удобства применения).

Определение 9. *Электронный документ – зафиксированная на материальном носителе в цифровой электронной форме информации с определенным составом реквизитов.*

Наконец, мы вплотную подошли к 3D-документу. Обозначение «3D» (от англ. 3-dimensional) означает «трехмерное», «имеющее три пространственных измерения». Каждая точка в трехмерном пространстве описывается тройкой чисел, называемых координатами. Если задать три взаимно перпендикулярные координатные оси, пересекающихся в начале координат, то получим прямоугольную (декартову) систему координат. Но можно задать и другие, например, косоугольные системы координат.

Определение 10. *Привязка к системе координат – соотнесение координат с различными точками объекта.*

Авторами замечательно точного термина «3D-документ» (но не его определения) стал Дитер Фелнер и его коллеги в 2007 году [Fellner et al., 2007]. С тех пор термин завоевал признание и помог уяснить простой факт: виртуальные пространственные (3D) модели являются точно такими же трехмерными документами, как фотографии или чертежи — двумерными.

Сформулируем базовое определение 3D-документа.

Определение 11. *3D-документ – зафиксированная на материальном носителе в цифровой электронной форме в привязке к трехмерной системе координат информация с определенным составом реквизитов, предназначенная для хранения и предъявления пользователю трехмерного (пространственного) визуального образа (3D-модели) объекта или процесса, а также дополнительной информации, связанной с данной 3D-моделью.*

Такое определение 3D-документа, несмотря на достаточную его точность, невозможно включить в нормативный акт в силу определенных требований законодательной техники. Мы не будем здесь заниматься юридической адаптацией данного определения, а имея конкретную цель — описание правового режима 3D-документа, ограничимся лишь предложениями по дополнению действующих норм.

Любая 3D-модель описывается пространственно-временными и качественными свойствами. Первые задают структуру (элементы, связи) объекта, пространственные характеристики (топология, геометрия либо непрерывное распределение некоторого параметра) и пространственную ориентацию объекта в привязке к некоторой системе координат. Пространственная информация о геометрии и структуре объекта в 3D-документе хранится в некоторой трехмерной системе координат, связанной с объектом. В этом состоит его принципиальное отличие от рисунков, схем, чертежей, фото- и кинодокументов, которые сохраняют двумерные изображения объекта. В 3D-документе хранится и качественная информация об объекте. Качественные свойства характеризуют материалы и задают внешний облик объекта (текстура).

Простейшим примером 3D-документа является точечная модель объекта, полученная в результате его лазерного сканирования («облако точек», point cloud). На основе облака точек может быть построена трехмерная полигональная модель объекта (mesh), трехмерная твердотельная модель (solid). Также 3D-документ может быть создан в результате применения методов томографии (построение 3D-модели внутренней структуры объекта по его послойным сечениям), фотограмметрии (построение 3D-модели объекта по его двумерным изображениям с разных ракурсов), в результате 3D-моделирования по чертежам и т.д.

В общем случае, 3D-документ представляет собой агрегированный комплекс, состоящий из следующих элементов: (1) 3D-модель (визуальный образ) объекта; (2) информация (иногда слабоструктурированная), дополняющая модель и связанная с ней; (3) связующие файлы; (4) пользовательский интерфейс; (5) состав реквизитов.

Модель объекта может быть связана посредством взаимных ссылок с другими типами электронных документов — текстовыми, графическими, аудио- и видеофайлами, сохраненными в базах данных или файловых системах, в том числе на удаленных серверах, доступных через интернет.

Для просмотра 3D-моделей и взаимодействия с ними необходимо использовать специальный программный инструментарий. Для различных форматов 3D-документов используются разнообразные программные средства.

Для отображения цифровой 3D-модели объекта на экране компьютера и манипуляций с ней используется соответствующее программное обеспечение. Существуют стандартные форматы 3D-моделей, просмотр которых поддерживается многими свободно доступными программными средствами.

Развитый 3D-документ, включающий в себя набор взаимосвязанных 3D-моделей и связанную с ними дополнительную информацию, тем более может требовать специализированного программного инструментария для

просмотра. Однако такой 3D-документ также может быть интегрирован с инструментарием просмотра в единое пользовательское приложение (программу, которую пользователь устанавливает на свой компьютер) или веб-приложение (для просмотра через браузер).

4.2.2 Правовая природа 3D-документа

Разберем теперь правовую природу 3D-документа.

3D-документ может объединять элементы с разными правовыми режимами. В частности, интеллектуальные права на 3D-модель, связанные с ней данные и программный инструментарий могут принадлежать частным лицам или организациям, как российским, так и зарубежным. Порядок использования таких моделей, данных и программного кода может определяться как общими условиями части IV Гражданского кодекса Российской Федерации (или соответствующим законодательством других стран), так и различными лицензионными договорами, в том числе допускающими свободное или относительно свободное использование. Объединение столь разнородных элементов в едином продукте (например, пользовательском приложении) существенно затрудняет четкую формализацию его правового режима, но позволяет говорить о 3D-документ как о сложном объекте в смысле ст. 1240 Гражданского кодекса РФ (ГК РФ). В качестве примера п.1 ст. 1240 ГК РФ называет кинофильм, и надо признать, сравнение кинематографического произведения и 3D-документа очень удачно, тем более что в приводимом закрытом перечне рядом с кинофильмом стоит мультимедийный продукт.

Определения понятия «мультимедийный продукт» ГК РФ не содержит, но термин «мультимедиа», «мультимедийный» имеет устойчивое значение – сочетающий различные формы представления информации (текст, изображение, аудио- и видеоряд, анимированная компьютерная графика и т.п.). Введение понятия «мультимедийный продукт» подверглось критике в юридической литературе. Указывалось, что термин «мультимедийное

произведение» является более корректным. Авторы [Батулин, Леонов, 2017] придерживаются того же мнения, однако нормативное закрепление термина «мультимедийный продукт» требует сформулировать его определение, необходимое для дальнейшего анализа.

Определение 12. *Мультимедийный продукт – цифровой электронный продукт (файл, программа и т.п.), обеспечивающий отображение информации для восприятия различными органами чувств человека одновременно, в том числе в процессе интерактивного взаимодействия с пользователем.*

Однако ст.1240 ГК РФ говорит о сложном объекте не в смысле технической сложности его структуры или процесса его создания, а исходя из его юридической сложности. По всей видимости, договорные отношения по созданию мультимедийного продукта, являющегося сложным объектом авторских прав и включающего в себя несколько охраняемых результатов интеллектуальной деятельности, требуют и сложносоставного правового режима.

В предположении, что 3D-документ есть один из видов мультимедийного продукта, разберем процесс и стадии его создания.

На первом этапе получают первичные трехмерные данные и проводят их первичную обработку. Например, в случае лазерного сканирования объекта с разных точек это объединение данных с разных точек («сшивка»), прореживание полученного «облака точек» и при необходимости - удаление шума (лишних частей). Для того чтобы точно «сшить» сканы крупного объекта, как правило, требуется предварительно создать сеть планово-высотного геодезического съемочного обоснования (либо временную, типа бумажных или магнитных меток, которые временно устанавливаются на объект или окружающие здания и сооружения, либо постоянную, типа дюбелей забитых в пол или стены, либо забетонированных геодезических опорных знаков). При необходимости, осуществляется привязка этой сети к мировой/ региональной/ внутри-объектовой системе координат. Работу

выполняют геодезисты, специалисты по сканированию, специалисты по первичной обработке данных сканирования. Здесь возникает первая группа договорных отношений. Для удобства стороны в договоре является юридическое лицо – подрядчик работ.

Важно отметить, что первичные данные сканирования («облако точек») уже сами по себе – 3D-документ. Но над ним продолжается работа: на основе первичных данных создается 3D-модель.

На этом, втором этапе необходим сценарий будущего использования, т.к. от него зависит объем модели (количество полигонов), разделение модели на составные части, способы текстурирования и т.д. Для десктопного (автономного) приложения нужна одна модель, а для веб-приложения – другая (проще и «легче»); это две разные модели, и одна из другой автоматически не получается. Для простого просмотра объекта нужна только 3D-модель объекта, а, например, для обучающего приложения – исторической визуализации – также и дополнительные 3D-модели («как было», «как могло быть», аватары персонажей, 3D-модели движущейся техники, элементов объекта и т.д. и т.п.). То есть, критически важно заранее изготовить сценарий использования 3D-документа и составить техническое задание на работы, что является творческим трудом. Техническое задание составляет руководитель (организатор) работ во взаимодействии с основными исполнителями, чтобы понимать, что и какими усилиями может быть достигнуто.

Если изначально четко определить сценарий использования и написать техническое задание, то теоретически можно добиться такого разделения труда, чтобы в дальнейшем каждый специалист выполнял только свою часть работы (как при подготовке энциклопедии). В реальности, когда создается что-то новое, процесс оказывается итеративным: приходится неоднократно править 3D-модель и обновлять приложение, тестировать, находить ошибки, опять править, обновлять, и далее с повторением цикла.

Моделирование выполняет один специалист или коллектив специалистов, среди них тоже может быть свое разделение труда (высокополигональное моделирование, низкополигональное моделирование, текстурирование, аватары и анимация и др.) В случае сложного объекта договор также заключается не со всеми физическими лицами отдельно, а с юридическим лицом – подрядчиком работ по моделированию.

Так формируется вторая группа договорных отношений.

Заметим, что 3D-модель, созданная на втором этапе работ, – это также 3D-документ.

На третьем этапе на основе 3D-моделей, создаются приложения (автономное, веб). Для создания каждого приложения нужна работа программиста/дизайнера или группы программистов/дизайнеров, которые должны выполнить в общем случае три основные функции:

а) создание и общая настройка сцены (т.е. импорт созданных 3D-моделей и анимаций, отладка, исправление ошибок);

б) оптимизация производительности и визуальной реалистичности за счет встроенных средств программного инструментария (растительность, атмосфера, вода, освещение, дополнительные модели людей, животных, машин и проч.);

в) создание и отладка пользовательского интерфейса.

Здесь могут использоваться покупные (готовые) 3D-модели и другие необходимые элементы (например, модели растительности; анимированные модели людей, животных, машин; файлы звукового сопровождения), или заказные работы (дизайн интерфейса, индивидуальные 3D-модели каких-то вспомогательных объектов, необходимые для реалистичности; индивидуальное аудио сопровождение и т.д.)

Каждое 3D-приложение, разрабатываемое с использованием программного инструментария, включает в себя несколько типов программного кода с различным правовым режимом:

- модули, созданные на основе открытого программного обеспечения (бесплатное использование для некоммерческих целей);
- модули, созданные по заказу (договору);
- модули, созданные разработчиком для себя;
- модули, связывающие модель с базами данных и др.

Таким образом, возникают три группы договоров: с программистом (программистами), с дизайнером (дизайнерами) интерфейса, с продавцами отдельных компонентов (в том числе через интернет). К этому добавляются договорные отношения, связанные с использованием программного инструментария, который может быть бесплатным или платным, но с ограничениями, например, только для некоммерческого использования, или платным (с разными видами лицензий). К модели может потребоваться привязать дополнительные данные (например – тексты, изображения), их тоже надо готовить. Всем этим кто-то будет заниматься, скорее всего, тоже по договору. Если это архивные данные, предметы искусства, литературные или музыкальные произведения, нужно получить разрешение правообладателей. Отсюда и будет складываться сложносоставной правовой режим 3D-документа. Нужно иметь в виду также и многослойность этого правового режима: он будет состоять из правового состояния первичных данных (например, «облака точек»), правового состояния 3D-модели (или набора 3D-моделей) и правового состояния окончательного продукта (например, веб-приложения для демонстрации созданной 3D-модели и доступа к связанной с ней базе данных).

Итак, 3D-документ создается в результате сложного, длительного процесса, в котором принимают участие большое число творческих и иных работников, осуществляющих разнородную деятельность. Предельно полное (по кругу лиц) признание их прав с юридическим их оформлением приведет к чрезмерному усложнению порядка введения данного мультимедийного продукта в коммерческий оборот, а сужение круга лиц – к нарушению прав части авторов. Поэтому необходимо очертить номинальный круг авторов

3D-документа. Наверное, начать надо с перечисления лиц (организатор, сценаристы, программисты, композитор и музыканты, художники, ученые, авторы текстов, дизайнеры и др.), трудом которых создается 3D-документ. Затем распределить их по группам с обобщенными функциями:

- организационно-административный состав: работодатели (разработчик, заказчик), продюсеры (организатор, руководитель, спонсор);
- творческий состав: авторы результатов интеллектуальной деятельности, определяющих содержание 3D-документа (техническое задание, сценарий, тексты, художественные компоненты и т.д.);
- технический состав – исполнители работ по техническому заданию: специалисты по регистрации и обработке первичных данных, специалисты по 3D-моделированию, программисты;
- группа обеспечения «аудиовизуальной реалистичности»: специалисты, решающие в рамках ТЗ комплексную творческую и техническую задачу создания визуально реалистичной сцены, которая обеспечивает эффект «погружения» (программист, дизайнер, композитор, арт-директор);
- группа рынка и общественного распространения: редакторы (приведение 3D-документа к товарному виду) и издатели (введение в коммерческий оборот или распространение в обществе).

В реальности будет наблюдаться пересечение этих групп по кругу лиц. Это будет усложнять составной правовой режим создаваемого 3D-документа, что, впрочем, неизбежно.

Особо остановимся на трудной функции руководства весьма сложным, описанным выше процессом создания 3D-документа. В киноиндустрии таким лицом является продюсер (ст.3 № 126-ФЗ «О государственной поддержке кинематографии Российской Федерации» от 22.08.1996; п.4 ст.1263 ГК РФ), в нашем случае – это лицо, осуществляющее научно-техническое и художественное руководство, организационно-административное управление и финансовый контроль за созданием 3D-

документа. Его можно назвать «руководитель», «научный руководитель», «художественный руководитель», «продюсер», «организатор», «разработчик 3D-документа», «заказчик». Все перечисленные понятия отражают основные функции данного лица. В связи с формулой п.1 ст.1240 ГК РФ *«лицо, организовавшее создание сложного объекта, включающего несколько охраняемых результатов интеллектуальной деятельности»* в качестве краткой ее записи предпочтительным представляется понятие «организатор». Вне зависимости от того, какой термин выбрать, права и обязанности главного лица должны быть определены максимально конкретно, потому что, во-первых, он не может быть автором, если помимо функций организатора он не выполнял самостоятельную или в соавторстве творческую работу (согласно ст.1257 ГК РФ авторами признаются только лица, внесшие творческий вклад; в соответствии со ст.1240 ГК РФ организатор приобретает право использования полученных результатов), а во-вторых, его нельзя ставить в зависимость от несовпадающих желаний и воли каждого участника разнородной деятельности, имеющего свои права.

Вообще, является ли работа творческой или рутинной, зависит от сложности задач. Например, часто организатор выступает не только как административный руководитель, но и как творческий руководитель: разработчик сценария и технического задания на работы, а также контролер на всех промежуточных этапах – получается ли то, что было задумано? Выглядит ли так, как ожидалось? Что нужно исправить или улучшить? То есть, если брать аналогию с кино, организатор (продюсер) работает и как сценарист, и как режиссер. Работу организатора может взять на себя только высококвалифицированный специалист.

Аналогичная ситуация и с работой специалиста по моделированию. Например, создание даже самой по себе полигональной 3D-модели Шаболовской башни было исключительно творческой задачей, т.к. потребовалось разработать целую методику моделирования скрученных стержней [Leonov et al., 2015]. А для более простых объектов, это рутинная

задача, с которой любой исполнитель стандартной квалификации справится в рамках своих служебных обязанностей.

Схожая ситуация наблюдается и с разработкой интерфейса (работа дизайнера интерфейса), и с оптимизацией сцены по реалистичности (работа программиста). Для сложных, уникальных проектов получается совместное творчество. Для повторяющихся, однотипных проектов можно так наладить работу, чтобы исполнители работали самостоятельно и последовательно, как на конвейере, решая стандартные для своей квалификации задачи.

Итак, правовое положение 3D-документа логично рассматривать как составной правовой режим сложного объекта, включающего несколько результатов интеллектуальной деятельности (ст.1240 Гражданского кодекса РФ). Но к объекту такой сложности как 3D-документ нормы ст. 1240 ГК РФ применимы лишь при отсутствии споров и сомнений в том, что данный 3D-документ относится к категории мультимедийных продуктов. Это некоторое практическое ограничение, с которым приходится мириться.

4.2.3 3D-документ как единая технология: обсуждение

Второй вариант построения правового режима 3D-документа как сложного объекта – через понятие «единая технология», которой признается *«выраженный в объективной форме результат научно-технической деятельности, который включает в том или ином сочетании изобретения, полезные модели, промышленные образцы, программы для ЭВМ или другие результаты интеллектуальной деятельности, подлежащие правовой охране в соответствии с правилами настоящего раздела, и может служить технологической основой определенной практической деятельности в гражданской или военной сфере»* (ст.1542 ГК РФ).

Но как справедливо отмечает известный цивилист В. А. Дозорцев, правовая охрана единого объекта, *«висящая между двух стульев»*, не является надежной, действенной и эффективной. Правовая охрана *«должна базироваться только на монолитном, а не множественном основании»*

[Дозорцев, 2005, с.136]. Поэтому придется делать выбор из этих двух вариантов! И этот выбор будет не в пользу «единой технологии».

Прежде всего, потому что название термина не соответствует вкладываемому в него содержанию. Как «технология» — это не совокупность методов и инструментов для достижения изготовления желаемого результата (в этом смысле используется терминология «технологии, технические устройства или их компоненты» в п.1 ст.1299 ГК РФ и в ст.1309 ГК РФ), а обобщенный результат, основанный на иных результатах, — иначе говоря, результат второго порядка; результат, полученный из результатов. С этой точки зрения, 3D-документ может быть интерпретирован нужным образом. Так, «облако точек» — есть 3D-документ, самостоятельный результат, но вместе с тем, на основе этого результата создается 3D-модель, которая тоже есть 3D-документ, новый результат. В свою очередь, сделанное на основе 3D-модели приложение — тоже самостоятельный результат. Казалось бы, очень удобно выстраивать правовой режим 3D-документа. Однако это не так. Мешают внутренние противоречия.

Как «единая» эта технология не находится в единстве. В самом деле, по смыслу главы 77 ГК РФ, превратившись в составную часть единой технологии, результаты интеллектуальной деятельности не теряют своей самостоятельности (см. п. 2 ст. 1542 ГК РФ).

Введенная же в п.5 ст.1549 ГК РФ «часть технологии» оказывается не частью «единой технологии», а «технологии в целом», по-видимому, содержательно отличающихся друг от друга. Если рассматривать «технологию в целом» именно как технологию (как в ст.ст.1299 и 1309 ГК РФ), а не как некоторый результат, то в случае 3D-документа части технологии никак не сложатся в «технологию в целом», потому что для создания «облака точек» используется одна технология, для 3D-моделирования — другая, для рисования интерфейса — третья, для программирования — вообще комплекс разных технологий.

«Единая технология» задумана как результат преимущественно организационной, а не творческой деятельности, и выстроена исключительно под лицо, ее организовавшее (п.3 ст.1542 ГК РФ). Поэтому по смыслу ст. 1228 ГК РФ у единой технологии нет авторов. А авторам нет смысла предоставлять 3D-документу правовой режим единой технологии. Кроме того, единой технологией являются сложные результаты интеллектуальной деятельности, создаваемые только за счет или с привлечением федерального бюджета, что значительно сужает круг 3D-документов, в отношении которых полезно применить режим единой технологии, поскольку бизнесу не интересно вкладываться в такие проекты.

По перечисленным причинам правовой институт «единой технологии» рано или поздно придется заменить более адекватным понятием и механизмом, если он действительно нужен для каких-то важных государственных заданий. В любом случае, при заданных правовых условиях 3D-документ как сложный результат творческого труда многих авторов, не вписывается в режим «единой технологии».

4.3 Создание виртуального музея науки и техники на основе 3D-документов

4.3.1 Актуальность создания виртуальных музеев

Количество виртуальных 3D-моделей реальных или исторических объектов, создаваемых во всем мире, постоянно растет. В том числе, появляется все больше виртуальных 3D-моделей рукотворных и природных объектов, представляющих общественную ценность (от памятников культуры и природы до иных видов национального или мирового достояния). Такие 3D-модели представляют собой не только новый тип документа, сохраняющего информацию об объекте, но и новый тип музейного экспоната, который может (и должен) демонстрироваться широкой публике [Леонов, Бобков, 2013].

Целый ряд задач может быть практически решен только в виртуальной форме, в частности:

1. Демонстрация технических объектов большого масштаба (домны, прокатные станы, башни, мосты, верфи, шахты и т.п.);
2. Демонстрация в рамках единой экспозиции территориально разнесенных объектов, которые невозможно переместить физически в одно место;
3. Демонстрация разрушенных, утраченных объектов, восстановленных по чертежам или фотографиям, воссозданных в форме виртуальных 3D-моделей;
4. Визуализация работы исторических технических устройств, технологических процессов, исторических экспериментов и т.п.;
5. Визуализация исторических процессов, связанных с историей науки и техники, с географической привязкой к виртуальным картам или глобусу.

Важность применения новых технологий формирования и воспроизведения виртуальных образов для развития музейной деятельности признана на государственном уровне. Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 г. № 597 «О мероприятиях по реализации государственной социальной политики» Правительству поручено создать к 2018 году 27 виртуальных музеев.

Весной 2014 г. Министерством культуры Российской Федерации были разработаны рекомендации по созданию виртуальных музеев [Технические рекомендации..., 2014]. В этих рекомендациях дано следующее определение: *«Виртуальный музей — интерактивный мультимедийный программный продукт, представляющий музейные коллекции в электронном виде»* [Технические рекомендации..., 2014, С. 5]. К сожалению, такое определение ограничивает сферу применения виртуального музея лишь демонстрацией электронных образов музейных экспонатов. В то же время, виртуальная форма представления может широко применяться для объектов, которые музейными экспонатами не являются. К их числу относятся, например,

археологические памятники, объекты индустриального наследия, образы несуществующих объектов (виртуальная реконструкция), визуализация процессов и явлений.

В частности, одним из возможных направлений развития виртуального музея науки и техники представляется виртуальная реконструкция технических объектов, которые частично или полностью утеряны, либо находятся в плачевном техническом состоянии. Под виртуальной реконструкцией понимается восстановление исторического образа объекта в форме визуально реалистичной цифровой трехмерной модели. Такая реконструкция может быть выполнена на основе сохранившихся частей или элементов объекта, анализа аналогичных объектов (например, экспонатов в коллекциях других музеев), доступных исторических описаний, фотографий, видеозаписей, схем, чертежей.

Актуальность применения виртуальной реконструкции исторических объектов науки и техники обусловлена следующими соображениями.

1. Виртуальная реконструкция технического объекта может быть выполнена с существенно меньшими затратами, чем его физическая реставрация и реконструкция. Бюджеты проектов по физической реставрации могут исчисляться миллионами рублей, найти финансирование в таком объеме может быть затруднительно даже для ценных экспонатов в статусных музеях. Бюджеты проектов по виртуальной реконструкции могут начинаться с сумм, на 1-2 порядка меньших. При этом виртуальная реконструкция, в отличие от физической, может выполняться поэтапно, по мере возможности (например, с постепенным повышением детализации виртуальной 3D-модели). В то же время, физическая реставрация экспоната должна быть завершена полностью, прежде чем экспонат сможет занять место в экспозиции музея.

2. Виртуальная реконструкция позволяет подготовиться к физической реконструкции. В ходе виртуальной реконструкции выполняется общий анализ устройства объекта, моделирование утраченных деталей (включая

историко-техническое обоснование), проверяется общая пространственная компоновка объекта с учетом реконструированных элементов, выявляется недостаток данных для восстановления каких-либо элементов, или несоответствие имеющихся данных фактической геометрии объекта. Профессиональная реставрация сложного технического объекта часто включает его виртуальное 3D-моделирование как обязательную составную часть планирования реставрационных работ. В случае, если эта часть работ уже выполнена, реставраторам не придется повторять ее.

3. Виртуальная реконструкция позволяет представить образ объекта широкой публике намного более полно, чем традиционные средства (фотографии, текстовые описания). Прежде всего, это важно в той ситуации, когда сам объект находится в запасниках и публике не демонстрируется ввиду своего плохого состояния. Образ объекта может быть представлен как в форме мультимедийной презентации в рамках музейной экспозиции (например, такой, как видеоролик или интерактивная виртуальная 3D-модель на сенсорном экране), так и в форме Интернет-приложения на сайте музея или организаций - партнеров музея.

4. Виртуальная реконструкция позволяет восстановить несколько вариантов объекта. Это может быть актуально в тех случаях, когда существует несколько конкурирующих гипотез (например, о внутреннем устройстве объекта), выбор между которыми в настоящее время не может быть сделан ввиду недостатка данных, или в тех случаях, когда объект существовал в нескольких модификациях. Физическая реставрация/реконструкция позволяет воссоздать только один вариант объекта, который и будет представлен в музейной экспозиции.

5. Виртуальная реконструкция позволяет демонстрировать внутреннее устройство объекта. В традиционной музейной экспозиции, демонстрация внутреннего устройства осуществляется посредством препарирования экспоната (например, вырезания «окон» в корпусе, частичного распила внутренних элементов и т.п.). Для ценных экспонатов в хорошей

сохранности препарирование не выполняется – таким образом, их внутреннее устройство остается недоступным для просмотра. В то же время, при просмотре виртуальной модели можно легко управлять видимостью либо прозрачностью отдельных элементов (например, корпуса), что позволяет изучать внутреннее устройство объекта и его элементов.

6. Виртуальная реконструкция позволяет показать объект в динамике. В традиционной музейной экспозиции, даже прекрасно сохранившиеся экспонаты демонстрируются в статичном виде (более того – чем более ценен экспонат, тем меньше манипуляций с ним допускается). В отличие от самого экспоната, его виртуальный образ может быть анимирован для демонстрации его действия: например, можно показать работу механических систем, визуализировать работу электрической схемы и т.п. Этот пункт в равной степени относится к музейным экспонатам в любой степени сохранности.

Необходимо подчеркнуть, что виртуальная реконструкция не является заменой физической реконструкции и реставрации объекта. Напротив, она может быть использована для того, чтобы лучше подготовиться к физической реконструкции и реставрации объекта, и дополнить ее теми возможностями, которые невозможно реализовать для самого музейного экспоната.

4.3.2 Анализ технических рекомендаций Минкультуры России по созданию виртуальных музеев

Указом Президента РФ от 7 мая 2012 г. № 597 «О мероприятиях по реализации государственной социальной политики» Правительству поручено создать к 2018 году 27 виртуальных музеев. В 2014 г. Министерством культуры РФ были разработаны технические рекомендации по созданию виртуальных музеев (далее «Рекомендации») [Технические рекомендации..., 2014]. В этих рекомендациях виртуальный музей определяется как компьютерная программа: *«Виртуальный музей — интерактивный мультимедийный программный продукт, представляющий музейные коллекции в электронном виде»* [Технические рекомендации..., 2014, стр. 5] и

описываются три уровня его технологической реализации: на основе фотографий, на основе сферических фотопанорам и на основе 3D-моделей.

С технической точки зрения, указанный документ составлен достаточно грамотно, однако, по мнению автора, в нем упущены два важных методических момента, особенно важные с точки зрения разработки виртуального музея истории науки и техники [Леонов, 2014г], [Леонов, Рысь, 2015].

Во-первых, в Рекомендациях не проведено четкое различие между виртуальным музеем и «музеем, в котором представлены виртуальные объекты». Виртуальные объекты могут быть представлены в самом обычном, реальном музее (например, в форме интерактивных 3D-моделей на сенсорных экранах), или на веб-сайте музея – что само по себе еще не делает его «виртуальным музеем». Под виртуальным же музеем, по мнению автора, должно подразумеваться создание целостного виртуального образа, включающего виртуальные экспонаты, среду, в которой они расположены, и способ организации взаимодействия человека с этими виртуальными экспонатами. «Виртуальный музей» — это не только комплекс технических средств, обеспечивающий формирование образа, но и сам виртуальный образ, который должен возникать в воображении человека.

Музей — это нечто большее, чем склад экспонатов. Разница заключается в погружении посетителя в некоторую среду (т.е. наличие фона, на котором демонстрируются экспонаты), и организации взаимодействия посетителя с экспонатами по определенному сюжету (т.е. формирование экспозиции). Точно так же виртуальный музей — это нечто большее, чем набор (коллекция) виртуальных экспонатов. Необходимо обеспечить формирование цельного виртуального образа, в рамках которого посетитель может перемещаться от экспоната к экспонату, не теряя при этом степени погружения, и выбирать тот или иной вариант просмотра заранее сформированной экспозиции.

Виртуальный музей не обязательно должен являться точной цифровой копией реального музея. Этот вариант оправдан в некоторых ситуациях, например, когда здание или интерьеры музея сами по себе являются историческими объектами и памятником архитектуры. Но намного более широкие возможности открываются в создании синтетических сред, не имеющих аналога в реальности. Например, в рамках виртуального музея можно объединить в едином виртуальном пространстве экспонаты из коллекций разных музеев, которые не могут быть физически объединены в реальности. Или можно представить в виртуальной экспозиции, наряду с цифровыми копиями реальных объектов, результаты цифровой реконструкции (например, археологических экспонатов).

Во-вторых, определение «виртуального музея» в Рекомендациях сводит его задачи лишь к представлению музейных коллекций в электронном виде. Это существенно ограничивает спектр возможностей по сравнению с теми, которыми потенциально мог бы обладать виртуальный музей. В частности, из сферы виртуального музея исключаются образы объектов, не являющихся музейными экспонатами (например, крупномасштабных технических объектов и комплексов – башен, мостов, шахт, заводских цехов и т.п.); образы частично или полностью утраченных объектов (виртуальная реконструкция по чертежам, фотографиям); динамическая визуализация процессов и явлений, связанных с историческими техническими объектами (например, анимация работы технического устройства, визуализация технологического процесса, динамическая реконструкция исторического эксперимента и т.п.); визуализация событий в географическом контексте (например, на основе виртуального глобуса). А ведь эти типы виртуальных объектов представляют не меньшую важность для виртуального музея науки и техники, чем цифровые копии музейных коллекций.

Таким образом, при создании виртуального музея истории науки и техники представляется необходимым расширить толкование «виртуального музея», предложенное в Рекомендациях. Безусловно, задачи создания

цифровых копий музейных экспонатов и обеспечения широкого доступа к ним исключительно важны. Но намного более широкий круг задач — особенно в сфере истории науки и техники — связан с созданием синтетических сред (где используются образы как реально существующих, так и не существующих в настоящее время объектов) и динамической визуализацией.

Как было отмечено выше, в Рекомендациях [Технические рекомендации..., 2014] описываются три уровня технологической реализации виртуального музея: на основе фотографий, на основе сферических фотопанорам и на основе 3D-моделей. К сожалению, третьему уровню реализации уделено очень мало внимания; фактически, возможность использования 3D-моделей для презентации экспонатов лишь декларируется: *«...рекомендуется использовать трехмерные модели для представления объемных экспонатов — скульптур, предметов обихода и т.п. Трехмерные модели могут быть созданы методом моделирования, 3D-сканирования объекта, восстановления 3D по изображению и т.д. Презентация объемных экспонатов осуществляется путем демонстрации 3D-модели в интернет-браузере посетителя без дополнительного ПО (WebGL, Canvas) либо после установки расширений (Unity3D, Flash и др.)»* [Технические рекомендации..., 2014, стр. 35]. Таким образом, конкретная методология 3D-моделирования музейных экспонатов в рекомендациях не раскрыта; иллюстрации с примерами не приведены (в отличие от фотографий и сферических фотопанорам). Само перечисление объемных объектов (*«скульптуры, предметы обихода»*) свидетельствует о том, что специфика таких музейных экспонатов, как памятники техники, в данных рекомендациях не учтена (не говоря уже о моделировании технических объектов, которые не являются музейными экспонатами, и тем более о виртуальной реконструкции или динамической визуализации).

В то же время, в рекомендациях достаточно подробно рассматривается возможность использования 3D-модели самого музея для *«навигации*

посетителя по цифровым репликам объектов музейного хранения (экспонатам)» [Технические рекомендации..., 2014, стр. 10]. Предлагается создать *«3D-модель здания/помещений музея, по которой посетитель виртуального музея может свободно перемещаться», содержащую «области активации дополнительной информации, видео-, аудиовставки и интерактивные объекты»* [Технические рекомендации..., 2014, стр. 10]. При этом допускается как моделирование реального здания и помещений музея, *«максимально приближенное к прототипу»*, так и *«создание полностью виртуального музея»*, проектирование которого рекомендуется производить *«по аналогии с проектированием 3D-окружения в компьютерной игровой индустрии»*, с возможностью *«отклонения от реальных физических законов и евклидовой геометрии»* [Технические рекомендации..., 2014, стр. 33-34].

По нашему мнению, виртуальное моделирование выдуманных помещений для имитации «прогулки» по ним лишено смысла. Ведь зрителю интересны, прежде всего, экспонаты; а в виртуальной среде эти экспонаты могут сами «перемещаться» к зрителю (за четкую формулировку этой мысли автор благодарен И. В. Рысю).

В случае, когда само здание музея является памятником архитектуры (как, например, Государственный Эрмитаж), его виртуальное моделирование может иметь смысл; однако эта задача технологически намного сложнее моделирования любого отдельно взятого экспоната. В этом случае нужно само здание (или комплекс зданий) музея рассматривать как экспонат, и моделировать его, прежде всего, в этом качестве. Сложность здесь связана с объемом данных, необходимых для визуальной реалистичной и метрически точной передачи геометрии и особенно реальных текстур крупного архитектурного сооружения. Упрощенная же модель потеряет для зрителя самостоятельную ценность и станет тем самым «выдуманным помещением» — избыточной в виртуальном мире прослойкой между зрителем и набором экспонатов [Леонов, Рысь, 2015].

Единственным безусловно полезным вариантом представляется сильно упрощенная 3D-модель, предназначенная для предварительного ознакомления посетителей с расположением зданий и помещений музея (например, доступная на сайте музея) – но как раз такое использование 3D-модели музея в Рекомендациях никак не отмечено.

В качестве рекомендуемых технологий в Рекомендациях указаны Adobe Flash, Unity3D или их аналоги [Технические рекомендации..., 2014, стр. 14-15]. При этом для стационарных ПК использование технологий, требующих установки дополнительного ПО на устройства пользователя, допускается *«только при отсутствии иных вариантов реализации»*, а для мобильных ПК использование технологий, отличных от HTML, CSS, JavaScript, подразумевает *«создание специализированных мобильных приложений»* и размещение их в соответствующих магазинах приложений [Технические рекомендации..., 2014, с. 16]. Особо отмечается, что виртуальный музей *«должен поддерживать подключение к интернет-сайту путем показа виртуального музея внутри контейнера iframe» в двух режимах (оконном и полноэкранном)*, а также *«должен иметь версию, записываемую на электронные носители (CD, DVD, Flash) для работы без подключения к сети Интернет»* [Технические рекомендации..., 2014, с. 17]. Подчеркивается, что *«предпочтительно использование компонент и программных библиотек с открытым исходным кодом и лицензиями, не налагающими обязательств по раскрытию кода использующего их программного обеспечения»* [Технические рекомендации..., 2014, с. 18].

Данные рекомендации и требования можно оценить как технически грамотные и современные, за исключением требования, разрешающего установку дополнительного ПО *«при отсутствии иных вариантов реализации»*. Технология WebGL, которая с ноября 2013 г. поддерживается всеми основными браузерами (Internet Explorer, Mozilla Firefox, Google Chrome, Opera, Safari), позволяет реализовать просмотр трехмерной графики в окне браузера без установки дополнительного ПО (плагина). Таким

образом, остается неясным, в каких именно ситуациях авторами Рекомендаций допускается использование технологий, требующих установки дополнительного ПО.

Оценивая Рекомендации в целом, подчеркнем, что это важный и своевременный документ, отражающий актуальную задачу создания виртуальных музеев — но в нем, к сожалению, не учтена специфика виртуальных музеев в области истории науки и техники (в частности, специфика 3D-моделирования экспонатов технических музеев). Таким образом, следует отметить несомненную актуальность разработки методологии виртуального моделирования и виртуальной реконструкции памятников техники, которая бы дополнила рекомендации [Технические рекомендации..., 2014] с учетом специфики технических музеев (включая, в частности, классификацию объектов технического наследия с точки зрения предпочтительных вариантов их виртуального моделирования). Также следует отметить необходимость более широкой трактовки самого понятия «виртуальный музей» в области истории науки и техники.

В качестве примеров виртуального 3D-моделирования технических объектов можно привести 3D-модели экспонатов Смитсоновского музея (США), свободно доступные на веб-сайте музея в рамках проекта Smithsonian X3D (<http://3d.si.edu/browser>), а также разработки, выполненные в России: 3D-моделирование Шуховской башни на Шаболовке (<http://virtual.ihst.ru/unity/tower/tower.html>) [Аникушкин, Леонов, 2013], [Леонов и др., 2013] и реконструкция ее постройки [Андреев и др., 2012б], виртуальная реконструкция механизмов Чебышева [Андреев и др., 2012а], реконструкция и анимация воздуходушных мехов Нижнетагильского завода Демидовых [Баранов, Кузовкова, 2013], виртуальная реконструкция истории космических полетов советских/российских пилотируемых кораблей на основе виртуального глобуса [Бобков и др., 2013].

4.3.3 Прототип виртуального музея истории науки и техники на WebGL

Как отмечалось выше, наиболее массовый доступ к коллекции 3D-документов и виртуальному музею может быть обеспечен при использовании веб-технологий, т.е. за счет создания веб-приложения, предназначенного для просмотра с использованием браузера. Де-факто, стандартом представления 3D-графики в Интернете с 2013 г. является WebGL.

Эксперименты с применением WebGL для реализации виртуального музея ведут многие организации. Наиболее ярким примером является проект Smithsonian X 3D Смитсоновского института (США) [Cheves, 2014]. В то же время, необходимо подчеркнуть, что работа по созданию виртуальных музеев на основе трехмерных цифровых моделей находится сегодня в своей начальной стадии. В лучшем случае, речь идет о коллекциях виртуальных трехмерных экспонатов, а чаще — об отдельных виртуальных реконструкциях, как правило, в форме автономных приложений.

Эксперименты с созданием виртуальных экспонатов, развитием подходов к созданию виртуального музея истории науки и техники ведутся и в России [Бобков и др., 2016]. В частности, в ИИЕТ РАН созданы доступные в сети Интернет виртуальные 3D-модели Шуховской башни на Шаболовке [Leonov et al., 2015] и электромобиля «Колумбия» из коллекции Политехнического музея [Рысь и др., 2015а, 2015б, 2016].

Сами трехмерные модели разработаны в программах Autodesk 3ds Max и Blender по данным лазерного сканирования и другим источникам. Интерактивная визуализация реализована с помощью графического движка Unity3D. Unity3D позволяет запускать приложения на разных программных и аппаратных платформах: под разными операционными системами, на мобильных устройствах и в браузерах. Для запуска в браузере Unity3D использует технологию WebGL.

Показ виртуальных экспонатов в браузере на WebGL имеет ряд ограничений: урезанные права доступа, небольшой объем доступной памяти.

Также на практике возможно использование лишь небольших 3D-моделей из-за необходимости их скачивания каждый раз заново при обращении к веб-странице. Если модель скачивается долго, то случайный пользователь просто закроет страницу, и не будет ждать. Даже заинтересованный пользователь может покинуть виртуальный музей, если при каждом запуске ему придется долго ждать скачивания 3D-моделей. Поэтому при наличии высоко детализированной, подробной виртуальной модели экспоната требуется ее специальная оптимизация для веб-версии с уменьшением объема (размера файла) до приемлемого значения.

Из-за ограничений на объем скачиваемых данных в веб-версии, имеет смысл помимо веб-версии виртуального музея обеспечить также возможность автономного просмотра экспонатов с помощью отдельного приложения, которое пользователь однократно скачивает на свой компьютер и затем просматривает уже локально, без необходимости доступа в интернет. Такое приложение может поддерживать дополнительные функции, например, отображение экспонатов в шлемах виртуальной реальности, которые сейчас набирают популярность (Oculus Rift и т.п.). Для распространения информации об экспонатах в интернете и популяризации виртуального музея можно также использовать социальные сети.

Один из наиболее сложных методических вопросов в создании виртуального музея – организация общего виртуального пространства, в котором находятся виртуальные экспонаты. Для виртуального музея науки и техники основой такого виртуального пространства может быть, например, трехмерный граф взаимосвязей различных областей науки (кластерная структура), или упрощенная историческая схема развития науки и техники, где каждый последующий объект (научное открытие, техническое устройство и т.п.) является следствием из нескольких предыдущих и предшественником для нескольких последующих. Так или иначе, именно создание такого символического общего пространства (образа, структуры),

объединяющего разные экспонаты, и превращает коллекцию виртуальных экспонатов в виртуальный музей.

4.4 Выводы по главе 4

Виртуальное 3D-моделирование является эффективным средством сохранения информации об объектах, комплексах и процессах. Современные технологии трехмерной фиксации информации, такие как лазерное сканирование и фотограмметрия, позволяют сохранить намного больший объем информации об объекте, чем традиционные текстовые описания, двумерные схемы и чертежи, кинофотофонодокументы. Отличие цифровых трехмерных моделей от других (традиционных) способов документирования информации настолько велико, что позволяет говорить о возникновении нового типа документов: 3D-документов.

Впервые дано научное определение 3D-документа: *3D-документ – зафиксированная на материальном носителе в цифровой электронной форме в привязке к трехмерной системе координат информация с определенным составом реквизитов, предназначенная для хранения и предъявления пользователю трехмерного (пространственного) визуального образа (3D-модели) объекта или процесса, а также дополнительной информации, связанной с данной 3D-моделью.* Выделено три типа 3D-документов: первичные данные, метрически точная документация, рисунок, см. табл.

Сохранение трехмерной информации (3D-документирование) особенно актуально для объектов, находящихся под угрозой деградации и разрушения – прежде всего, объектов культурного и природного наследия, памятников науки и техники. Примером такой работы служит 3D-документирование Шуховской башни на Шаболовке, которая находится под угрозой уничтожения или разрушения. В ноябре 2013 г. созданные виртуальные 3D-модели башни вместе с программным обеспечением для их просмотра были переданы в РГАНТД и Архив РАН, причем впервые в России — как документ нового типа: 3D-документ [РГАНТД, 2013].

Полноценное включение 3D-документов в электронный документооборот сегодня сдерживается рядом проблем, основной из которых является отсутствие правовой и нормативной базы, неопределенность правового статуса 3D-документов в российском законодательстве. В законодательстве РФ отсутствует понятие «3D-документ»; правовой режим 3D-документа в законодательных и иных нормативных актах не конкретизирован; стандарт на состав реквизитов 3D-документа отсутствует. Как показал выполненный анализ, правовой режим 3D-документа является по своей природе составным, т.е. предполагает сочетание в одном 3D-документе элементов с разным правовым режимом. Соответственно, представляется предпочтительным конструировать правовой режим 3D-документа на основе понятия «мультимедиапродукта».

Важность создания виртуальных музеев признана в РФ на государственном уровне. Однако предложенное Министерством культуры РФ определение понятия «виртуальный музей» — *«интерактивный мультимедийный программный продукт, представляющий музейные коллекции в электронном виде»* — не учитывает специфику виртуальных музеев в области истории науки и техники, сводит задачи виртуального музея лишь к представлению музейных коллекций в электронном виде. Это существенно ограничивает спектр возможностей по сравнению с теми, которыми потенциально мог бы обладать виртуальный музей. Необходима более широкая трактовка понятия «виртуальный музей», по крайней мере, в области истории науки и техники.

Разработанные подходы к 3D-документированию и общедоступному представлению созданных виртуальных 3D-моделей (3D-документов) открывают широкие возможности создания современного образовательного инструментария, развития виртуальных музеев науки и техники, привлечения молодежи к изучению истории науки и техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что виртуальное 3D-моделирование может эффективно применяться для фиксации информации об объектах истории науки и техники, их документирования. Развитие технологий лазерного сканирования, фотограмметрии, томографии дало в руки ученым, инженерам, медикам новые мощные инструменты сохранения информации об объектах исследования в формате цифровых 3D-моделей. Эти технологии качественно отличаются от прежних способов документирования объектов (текст, рисунок, схема, фото- и киносъемка), существенно расширяют возможности сохранения и дальнейшего использования информации о пространственных характеристиках объекта. Таким образом, можно говорить о появлении нового типа научно-технической документации: 3D-документа.

Помимо документирования информации об объекте, 3D-модели могут также применяться для создания интерактивных приложений, свободно доступных в сети Интернет, для организации «виртуальных музеев», популяризации науки и техники с использованием программного инструментария, рассчитанного на самую широкую аудиторию.

В работе на ряде примеров доказано, что трехмерное документирование памятников техники не только позволяет сохранить более полную информацию о них и сделать эту информацию более доступной, но и ведет к новому витку их историко-технического исследования, позволяет получить новые историко-научные и историко-технические результаты.

Прежде всего, это связано с тем, что современные 3D-технологии позволяют сохранить намного больший объем геометрической информации об объекте, чем традиционные обмеры; эта информация затем может быть детально исследована на этапе камеральной обработки [Леонов, 2014а], [Леонов, 2015б]. Таким образом, на этапе камеральной обработки могут быть выявлены такие отличия фактической конструкции от архивной документации, на которые раньше не обращали внимания, а также

эффективно исследованы особенности конструкции, изучение которых «в поле» по тем или иным причинам затруднительно. Это особенно актуально при исследовании труднодоступных объектов.

Виртуальное 3D-моделирование памятников техники позволяет виртуально реконструировать утраченные элементы, проверять пространственные гипотезы об устройстве объекта и взаимодействии его частей [Рысь и др., 2015а, 2015б], [Баранов, Кузовкова, 2013], [Андреев и др., 2012б]. Тщательный анализ всех элементов конструкции, необходимый для ее виртуального 3D-моделирования, заставляет исследователя заново систематизировать имеющиеся данные, проверять их точность и полноту, выявлять лакуны и неточности в описании объекта.

Виртуальные 3D-модели крупных технических объектов или комплексов могут быть совмещены с виртуальной моделью их окружения (например, природного ландшафта, городской застройки, подземных структур, Земли в целом), что позволяет эффективно исследовать их взаимосвязи [Бобков и др., 2013], [Unver, Taylor, 2012]. Виртуальная 3D-модель может быть использована как основа для научной визуализации, в частности, для совмещения и визуализации разнородных данных об объекте в едином виртуальном пространстве и их комплексного анализа [Леонов и др., 2014], [Бобков и др., 2012а, 2012б], [Леонов и др., 2012].

Результаты исследования объектов науки и техники с применением 3D-технологий ясно показывают, что метрически точная 3D-модель является ценным историко-техническим, историко-научным источником, который позволяет начать новый виток исследования, казалось бы, хорошо знакомых объектов. Например, лазерное сканирование Шаболовской радиобашни позволило установить, что указанная в исторической документации высота башни более чем на 1 м отличается в меньшую сторону от реальной высоты [Леонов, 2015б], а детальный анализ конструкции с использованием 3D-модели позволил найти целый ряд отличий фактической конструкции от исторической документации [Леонов, 2014а, 2015б]. Виртуальное трехмерное

моделирование территории в районе Долины гейзеров на Камчатке позволило заново систематизировать гейзеры и другие достопримечательности этого района, сравнить данные разных исследователей [Леонов, 2012а, 2012б], что в дальнейшем было использовано при издании новых атласов, каталогов и путеводителей [Атлас..., 2014, 2015], [Леонов, 2017]. В начале 2015 г. по инициативе ИИЕТ РАН выполнено лазерное сканирование уникального экспоната Политехнического музея — электромобиля Columbia 1901 г. [Рысь и др., 2015а, 2015б], лазерное сканирование крейсера 1-го ранга Балтийского флота «Аврора» [Леонов, Аникушкин, 2016]. Созданные трехмерные точечные модели позволили с высокой точностью зафиксировать современное состояние этих объектов, что будет в дальнейшем использоваться для их историко-технического изучения, 3D-моделирования и подготовки к реставрации.

Отметим и еще один немаловажный момент. Научно-техническое наследие — одно из бесспорных достижений советского периода нашей истории. Не случайно многие советские символы являются техническими объектами или комплексами, либо именами людей, образы которых воплощают собой технические достижения. ГОЭЛРО и БАМ, Шаболовка и Останкино, Королев и Курчатов, sputnik, Gagarin, Kalashnikov... Таким образом, задача сохранения советского наследия в значительной степени состоит в сохранении технических объектов и комплексов, прежде всего, имеющих символическое значение. Применение лазерного сканирования для всемирно известных памятников техники советского периода, являющихся крупномасштабными техническими объектами, служит не только способом сохранения информации о них, но и средством популяризации новых 3D-технологий, средством привлечения внимания к возможностям новых технологий со стороны эксплуатирующих организаций, музеев, архивов.

Подводя итог вышесказанному, можно говорить о возникновении новой научной дисциплины – виртуальной истории науки и техники [Леонов, 2014в], которая лежит в русле общей мировой тенденции формирования и

изучения «виртуального наследия» (Virtual Heritage) — цифровых копий объектов культурного и природного наследия. Предметом виртуальной истории науки и техники являются виртуальные 3D-модели объектов истории науки и техники (3D-документы).

Виртуальная история науки и техники, как научная дисциплина, посвящена решению трех основных задач:

- 1) сохранение информации об объектах науки и техники в цифровой электронной форме, прежде всего, в форме 3D-документов,
- 2) представление этой информации заинтересованным специалистам и широкой публике с использованием всего арсенала современных технологий, включая интернет-доступ и стереоскопические системы виртуальной реальности,
- 3) изучение объектов с использованием той информации, которая содержится в их виртуальных моделях.

Перечисленная триада — «сохранять, показывать, изучать» — соответствует традиционным задачам музеев. Таким образом, виртуальная история науки и техники может рассматриваться, в том числе, как одно из современных направлений музейной деятельности, тесно связанное с тематикой виртуальных музеев. Соответственно, практическая ценность исследований в области виртуальной истории науки и техники заключается в разработке подходов, методов и технологий создания виртуальных музеев.

Можно сказать и иначе: задачей виртуальной истории науки и техники является создание (формирование) виртуального научно-технического наследия. Виртуальное научно-техническое наследие – это цифровые 3D-модели объектов науки и техники, созданные с использованием технологий трехмерного моделирования, лазерного сканирования, фотограмметрии, томографии и др., а также связанные с ними информационные системы и базы данных с информацией об этих объектах. Данный подход позволяет «воссоздавать» различные образцы техники и сооружений, в том числе

утраченные или недоступные физически, визуализировать различные процессы и явления, фрагменты исторических событий.

В заключение сформулируем основные **выводы**:

1. В диссертации исследован мировой и российский опыт применения цифрового 3D-моделирования для задач истории науки и техники. Показано, что применение 3D-технологий для задач истории науки и техники находится в начальной стадии. При этом виртуальное 3D-моделирование имеет большой потенциал для историко-научного и историко-технического исследования технических и природных объектов, сохранения информации об объектах и их популяризации.

2. Впервые исследована специфика применения 3D-технологий в задачах истории науки и техники и развиты новые методы и подходы к 3D-моделированию и визуализации крупномасштабных технических и природных объектов. Доказано, что цифровое 3D-моделирование является новым эффективным методом исследования объектов истории науки и техники (технических и природных объектов, процессов и комплексов). Доказано, что новые методы и технологии работы с трехмерной информацией позволяют на новом уровне подойти к исследованию известных объектов и получить новые историко-научные и историко-технические результаты.

На ряде примеров показано, что цифровое трехмерное моделирование позволяет успешно:

- реконструировать утерянные элементы (части) объекта и исторический облик объекта в целом;
- исследовать взаимосвязи элементов исследуемого объекта между собой и с внешней средой в их историческом развитии;
- исследовать структуру (конструкцию) и историю развития (жизненный цикл) технических и природных объектов;
- анализировать точность исторической документации и различия между документацией разных лет;

— изучать историю развития представлений об объекте; выдвигать и проверять гипотезы об истории развития и изучения объекта;

— систематизировать известную информацию и ставить вопросы для новых исследований.

3. Впервые выявлен ряд расхождений между фактической конструкцией Шуховской башни на Шаболовке и исторической документацией. В частности, благодаря виртуальному 3D-моделированию впервые установлена истинная высота оригинальной несущей конструкции Шуховской башни на Шаболовке – 145 м, которая более чем на метр отличается от значения, приведенного в сохранившейся обмерной документации. Впервые детально проанализированы расхождения проектной и обмерной документации с реальной конструкцией башни, выявлено упрощение технологии монтажа промежуточных колец непосредственно в ходе возведения башни.

4. Виртуальное 3D-моделирование территории Долины гейзеров на Камчатке позволило впервые провести подробный анализ истории развития картографии и топономики этого уникального природного объекта со сложным и меняющимся рельефом, определить точные географические координаты более чем 150 гейзеров и кипящих источников — как существующих, так и утерянных к настоящему времени. В результате этой работы был впервые создан и опубликован полный иллюстрированный каталог гейзеров и кипящих источников Кроноцкого заповедника, включающий все упоминавшиеся ранее в литературе объекты.

5. Виртуальное 3D-моделирование автомобиля «Колумбия» из коллекции Политехнического музея и виртуальная реконструкция утраченных элементов позволили выявить ошибки, допущенные при его реставрации, смоделировать расположение утраченных элементов и подготовиться к физической реставрации объекта.

6. Лазерное сканирование крейсера «Аврора», скульптуры «Родина-Мать зовёт!» позволило сохранить точную трехмерную информацию о

геометрии этих объектов, которая может оказаться полезной в будущем для различных научно-исследовательских и прикладных задач: оценки изменений геометрии (деформаций, деградации) объектов во времени, планировании реставраций и реконструкций, задач популяризации.

7. Виртуальное 3D-моделирование Денисовой пещеры на Алтае позволило с недоступным ранее уровнем точности проанализировать историческую документацию об археологических раскопках, выявить расхождение исторической документации с истинной геометрией пещеры. Впервые в России была создана трехмерная цифровая модель палеолитической пещерной стоянки, создан программный инструментарий для трехмерного анализа расположения археологических находок, анализа стратиграфии и осадконакопления.

8. В диссертации разработаны методы и технологии создания интерактивных 3D-приложений для представления виртуальных 3D-моделей. Представлен ряд примеров интерактивных 3D-приложений, разработанных автором совместно с коллегами для популяризации созданных виртуальных 3D-моделей объектов истории науки и техники. Разработаны как 3D-приложения с поддержкой стерео-режима для систем виртуальной реальности, так и 3D-приложения со свободным веб-доступом, основанные на современных технологиях визуализации трехмерной графики в браузере.

9. Виртуальные 3D-модели технических и природных объектов могут применяться для создания интерактивных 3D-демонстраций, реализующих принцип совмещения развлечения и образования — как для систем виртуальной реальности, основанных на стереоскопической визуализации, так и для массового доступа через сеть Интернет. Примеры проектов, выполненных в ходе работы над диссертацией, показывают, что виртуальное 3D-моделирование может успешно использоваться в задачах популяризации истории науки и техники.

10. Виртуальный глобус — цифровая трехмерная модель Земли — является удобным инструментарием для представления виртуальных 3D-

моделей крупномасштабных объектов и процессов, связанных с историей науки и техники. В диссертации приведены примеры успешного применения виртуального глобуса для представления крупномасштабных технических и природных объектов, расположенных на поверхности Земли, а также для визуализации виртуальных 3D-моделей технических объектов, крупномасштабных комплексов и систем в околоземном пространстве. В ходе работы над диссертацией автором совместно с коллегами были впервые разработаны и апробированы методы и технологии применения виртуального глобуса для визуализации виртуальных 3D-моделей крупномасштабных природных процессов, регистрируемых под поверхностью земли (геофизических данных).

11. Виртуальное 3D-моделирование является эффективным средством сохранения информации об объектах, комплексах и процессах. Современные технологии трехмерной фиксации информации, такие как лазерное сканирование и фотограмметрия, позволяют сохранить намного больший объем информации об объекте, чем традиционные текстовые описания, двумерные схемы и чертежи, кинофотофонодокументы. В диссертации доказывается, что информация, зафиксированная в привязке к трехмерной системе координат, представляет собой новый тип документа: 3D-документ.

12. В работе впервые дано научное определение 3D-документа: *3D-документ – зафиксированная на материальном носителе в цифровой электронной форме в привязке к трехмерной системе координат информация с определенным составом реквизитов, предназначенная для хранения и предъявления пользователю трехмерного (пространственного) визуального образа (3D-модели) объекта или процесса, а также дополнительной информации, связанной с данной 3D-моделью.* Выделено три типа 3D-документов: первичные трехмерные данные, метрически точная трехмерная документация, трехмерный рисунок.

13. Показано, что сохранение трехмерной информации (3D-документирование) особенно актуально для объектов, находящихся под

угрозой деградации и разрушения – прежде всего, объектов культурного и природного наследия, памятников науки и техники. Примером такой работы служит 3D-документирование Шуховской башни на Шаболовке, которая находится под угрозой уничтожения или разрушения. В 2013 г. созданные виртуальные 3D-модели башни вместе с программным обеспечением для их просмотра были переданы в РГАНТД и Архив РАН, причем впервые в России — как документ нового типа: 3D-документ [РГАНТД, 2013].

14. Разработанные в диссертации подходы к 3D-документированию и общедоступному представлению созданных виртуальных 3D-моделей (3D-документов) открывают широкие возможности создания современного образовательного инструментария, развития виртуальных музеев науки и техники, привлечения молодежи к изучению истории науки и техники.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом

Гб – гигабайт

ГИС – геоинформационная система

ГС РАН – Геофизическая служба РАН

ГСПИ РТВ – Государственный специализированный проектный институт радио и телевидения

ГЦ РАН – Геофизический центр РАН

Д. – дело

ДВО РАН – Дальневосточное отделение Российской академии наук

ДЗЗ – дистанционное зондирование земли

ИВиС РАН – Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

ИИЕТ РАН – Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова Российской академии наук

ИНГГ СО РАН – Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН

Кб – килобайт

КФ ГС РАН – Камчатский филиал Геофизической службы РАН

КФФД – кинофотофонодокумент

Л. – лист

Мб – мегабайт

МИТП РАН – Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

МЧС России – Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий

Оп. - опись

ОРУ – открытое распределительное устройство
ПАО – публичное акционерное общество
ПДВ – постоянно действующая выставка
ПК – персональный компьютер
ПО – программное обеспечение
ПМЭС – предприятие магистральных электрических сетей
ПС – подстанция
ППР – план производства работ
РАН – Российская академия наук
РГАНТД – Российский государственный архив научно-технической документации

С., с. – страница

САПР – система автоматизированного проектирования
СО РАН – Сибирское отделение Российской академии наук
СППР – система поддержки принятия решений
СС., сс. – страницы
СССР – Союз Советских Социалистических Республик
США – Соединенные Штаты Америки
ФГБУ – Федеральное государственное бюджетное учреждение
ФГБУН – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ФСК ЕЭС – Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы

ЦВММ – Центральный военно-морской музей
ЦМР – цифровая модель рельефа
ЦНИИПромзданий – Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений
ЦНИИПСК – Центральный Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций им. Н. П. Мельникова
ЭВМ – электронная вычислительная машина

3D – трехмерный, заданный в трехмерной системе координат

API – Application Programming Interfac, интерфейс для программирования приложений (набор готовых классов, функций, структур и констант, предоставляемых приложением (библиотекой, сервисом) для ее использования во внешних программных продуктах)

BGN – United States Board on Geographic Names, Совет США по географическим названиям

BIM – Building Information Modeling, «информационное моделирование зданий» (подход к проектированию, строительству, эксплуатации и ремонту здания, основанный на использовании его динамической виртуальной 3D-модели и связанной с ней базы данных)

CSS – Cascading Style Sheets, каскадные таблицы стилей (набор параметров форматирования, описывающих внешний вид документа, размеченного языком разметки, таким как HTML, XML, KML и др.)

DSS – Decision Support System, система поддержки принятия решений

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing, плотное спектральное мультиплексирование (технология передачи данных в оптическом волокне с мультиплексированием каналов по длинам волн)

EDMS – Electronic Document Management System, система электронного документооборота

GNU – свободная UNIX-подобная операционная система GNU (имя собственное)

GPL – GNU General Public License, Универсальная общественная лицензия GNU (лицензия на свободное программное обеспечение, по которой автор передает созданное программное обеспечение в общественную собственность)

GPS – Global Positioning System, глобальная система спутникового позиционирования

GUI – Graphical User Interface, графический интерфейс пользователя

HTML – HyperText Markup Language, язык разметки гипертекста

ICONOS – спутник ICONOS (имя собственное)

KML – Keyhole Markup Language, язык разметки Keyhole (язык разметки на основе XML для представления трехмерных геопространственных данных в программе «Google Планета Земля» («Keyhole» до ее приобретения «Google»))

LGPL – GNU Lesser General Public License, ослабленный вариант лицензии GPL (лицензия, позволяющая использовать созданное свободное программное обеспечение (обычно библиотеки) в коммерческом ПО)

MERIS – Medium Resolution Imaging Spectrometer, спектрометр среднего разрешения

NASA – National Aeronautics and Space Administration, национальное управление по авиации и исследованию космического пространства

P., p. – page, страница

PCGN – Permanent Committee on Geographical Names for British Official Use, Постоянный комитет по географическим названиям для британского официального использования

PP., pp. – pages, страницы

RGB – Red, Green, Blue – формат описания цвета через три составляющие его цветовые компоненты (красную, зеленую, синюю)

SDK – Software Development Kit, набор средств разработки (программный инструментарий, который позволяет специалистам по программному обеспечению создавать приложения для определенного устройства, пакета программ, операционной системы и т. п.).

SRTM – Shuttle radar topographic mission, международная миссия по получению данных цифровой модели рельефа (ЦМР) территории Земли

USGS – United States Geological Survey, геологическая служба США

VE – Virtual Environment, виртуальное окружение

VR – Virtual Reality, виртуальная реальность

XML – eXtensible Markup Language, расширяемый язык разметки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Архивные источники

1. Архив ГСПИ РТВ. Заказ № 4138. Реконструкция оконечной аппаратной РРЛ. МТЦ (Шаболовка). ГСПИ Минсвязи СССР. Москва. 1969 г. [Архив ГСПИ РТВ, 1969]
2. Архив РАН. Ф. 1508. Оп. 1. Д. 61. Рабочая тетрадь В.Г. Шухова (записи с 22.03.1918 г. по 10.10.1922 г.). [Архив РАН, 1918-1922].
3. Архив РАН. Ф. 1508. Оп. 1. Д. 85. Л. 1. «Шабловская радио-башня системы инж. Шухова. Высота 150 мт. Проект 1919 г.»: проект башни высотой 150 м из шести секций, со схемами нескольких соединительных узлов в сборе. 1919 г. [Архив РАН, 1919а].
4. Архив РАН. Ф. 1508. Оп. 1. Д. 84. Л. 2. Проект башни высотой 350 м из девяти секций. 1919 г. [Архив РАН, 1919б].
5. Архив ЦНИИПромзданий. Реконструкция несущих конструкций радиобашни Шухова по адресу: г. Москва, ул. Шухова, д. 10, стр. 2. Проект. Конструктивные и объемно-планировочные решения. ОАО «ЦНИИПромзданий», Москва, 2011. [Архив ЦНИИПромзданий, 2011].
6. Архив ЦНИИПСК им. Мельникова. Шифр 281. Обследование металлоконструкций башни системы Шухова Московского телевизионного центра. 1947 г. [Архив ЦНИИПСК, 1947].
7. Архив ЦНИИПСК им. Мельникова. Шифр ОРИС-569. Определение несущей способности металлоконструкций телебашни системы Шухова и составление заключения о возможности ее дальнейшей эксплуатации. 1971 г. [Архив ЦНИИПСК, 1971].
8. Архив ЦНИИПСК им. Мельникова. Шифр 20-Ф 5720-1-КМ. Металлоконструкции надстройки башни Шухова для крепления антенн УКВ-ЧМ. 1991 г. [Архив ЦНИИПСК, 1991].

9. РГАНТД. Ф. 166. Оп. 1. Д. 36. Л. 1. «Сетчатая башня системы Инженера В. Г. Шухова. Высота башни = 150 metr. для беспроводного телеграфа. Фундамент»: схема фундамента. 1921 г. [РГАНТД, 1921а].

10. РГАНТД. Ф. 166. Оп. 1. Д. 36. Л. 2. «Верхнее кольцо 2й секции радио-башни»: схема узла стыка ног 2 и 3 секций. 1921 г. [РГАНТД, 1921б].

11. РГАНТД. Ф. 399. Оп. 1. «Виртуальная модель Шуховской башни на Шаболовке», 2013 г. [РГАНТД, 2013].

Литература на русском языке

1. *Алейников А. А., Бобков А. Е., Дроздин В. А., Еремченко Е. Н., Леонов А. В., Шпиленок Т. И.* Интерактивное 3D-приложение «Виртуальная Долина гейзеров» // Компьютерные инструменты в образовании. 2011. № 4. — С. 45-53. [Алейников и др., 2011].

2. *Андреев Н. Н., Калиниченко М. А., Кокшаров Р. А., Панюнин Н. М.* Механизмы Пафнутия Львовича Чебышева // XVIII годичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН: Москва, Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, 17–19 апреля 2012 г.: Труды конференции, Т. II. — М.: Янус-К, 2012. — С. 835-837. [Андреев и др., 2012а].

3. *Андреев Н. Н., Жулин А. Ю., Калиниченко М. А., Панюнин Н. М.* Компьютерная реконструкция постройки башни В.Г. Шухова на Шаболовке // XVIII годичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН: Москва, Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, 17–19 апреля 2012 г.: Труды конференции, Т. II. — М.: Янус-К, 2012. — С. 833-834. [Андреев и др., 2012б].

4. *Аникушкин М. Н., Леонов А. В.* 3D-моделирование Шуховской башни на Шаболовке на основе лазерного сканирования // Промышленное и гражданское строительство. — 2013. — №4. — С. 57-59. [Аникушкин, Леонов, 2013].

5. *Аникушкин М. Н., Леонов А. В.* Результаты спутниковой геодезической съемки в Долине гейзеров в 2009 году. В сб.: Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника. Выпуск 3 / Отв. ред. А. П. Никаноров. Воронеж: ООО «СТП», 2014. [Аникушкин, Леонов, 2014].

6. *Аникушкин М. Н., Иванов А. В., Леонов А. В.* О первых результатах лазерного сканирования и 3D-моделирования Шуховской башни на Шаболовке. В сб.: XVIII годичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН: Москва, Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, 17–19 апреля 2012 г.: Труды конференции, Т. II. / Отв. ред. Ю. М. Батулин. — М.: Янус-К, 2012.— С. 838-841. [Аникушкин и др., 2012].

7. *Аникушкин М. Н., Бобков А. Е., Леонов А. В.* Создание виртуальной 3D модели Денисовой пещеры на Алтае. В сб.: Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН. Годичная научная конференция (2013). Т. 2 / Отв. ред. Ю. М. Батулин. — М.: ЛЕНАНД, 2013. — С. 372-373. [Аникушкин и др., 2013].

8. *Аникушкин М. Н., Леонов А. В., Буйнов А. В.* Опыт применения интерактивной 3D-модели на подстанции 220 кВ // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. — 2017. — № 2 (41). — С. 42-45. [Аникушкин и др., 2017].

9. *Арнхейм Р.* Искусство и визуальное восприятие. М.: «Прогресс», 1974. [Арнхейм, 1974].

10. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / отв. ред. А. В. Завадская; картография В. М. Яблоков; авт. коллектив: А. В. Завадская, В. М. Яблоков, Д. М. Паничева, **А. В. Леонов**, А. В. Кирюхин, М. С. Овчаренко, И. Н. Семенов, М. В. Прозорова, А. П. Никоноров, А. Л. Матвеев. — ISBN 978-5-98708-029-0. — Елизово, 2014. — 80 с. [Атлас..., 2014].

11. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / Отв. ред. А. В. Завадская. Авт. коллектив: А. В. Завадская, В. М. Яблоков, Д. М. Паничева, **А. В. Леонов**, А. В. Кирюхин, М. С. Овчаренко, И. Н. Семенов, М. В. Прозорова, А. П. Никоноров, А. Л. Матвеев. — ISBN 978-5-396-00695-9. — М.: КРАСАНД, 2015. — 88 с. [Атлас..., 2015].

12. *Байгозин Д. А., Батурич Ю. М., Гебель М., Клименко С. В., Леонов А. В., Никитин И. Н., Никитина Л. Д.* Интерактивное повествование в виртуальном окружении: обучающая система «Виртуальный планетарий». Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2004. Т. 5. № 2. С. 10-23. [Байгозин и др., 2004].

13. *Баранов Ю. М., Кузовкова М. В.* Исследование, реконструкция, 3D-моделирование и анимация воздуходушных мехов Нижнетагильского завода Демидовых (1860-1880-е гг.) // Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН. Годичная научная конференция (2013). Т. 2. — М.: ЛЕНАНД, 2013. — С. 374-376. [Баранов, Кузовкова, 2013].

14. *Батурич Ю. М.* Восприятие объектов в виртуальной истории науки и техники // XVIII годичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН: Москва, Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, 17–19 апреля 2012 г.: Труды конференции, Т. II. М.: Янус-К, 2012. С. 841—845. [Батурич, 2012].

15. *Батурич Ю. М.* Невозможные технические устройства и особенности восприятия 3D-документов виртуальной истории науки и техники // В кн.: Институт истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, 2013. Том 2. — М., ЛЕНАНД, 2013, С. 377-380. [Батурич, 2013].

16. *Батурич Ю. М., Леонов А. В.* 3D-документирование объектов истории науки и техники. В сб.: Документ. Архив. История. Современность. Материалы IV Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 1-4 ноября 2012 г. / Отв. ред. Л. Н. Мазур. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 124-127. [Батурич, Леонов, 2012].

17. *Батурин Ю. М., Леонов А. В.* Правовой режим 3D-документа // Междисциплинарные методы в истории науки и техники. Материалы конференции (2016). / М.: ИИЕТ РАН, 2017. – В печати. [Батурин, Леонов, 2017].

18. *Батурин Ю. М., Клименко А. С., Клименко С. В., Коньшев В. А., Леонов А. В., Сумкин Д. А., Щербинин Д. Ю.* Применение 3D-документов для представления достижений науки и техники. В сб.: Труды годичной научной конференции ИИЕТ РАН, посвященной 120-летию со дня рождения С. И. Вавилова, 2011 / Отв. ред. Ю. М. Батурин. — М.: Янус-К, 2011. — С. 523-525. [Батурин и др., 2011].

19. *Белосохов Д. Е., Бобков А. Е., Леонов А. В.* Возможности 3D-визуализации для эффективного представления результатов научных исследований. В сб.: Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9-15 октября 2011 г. / Отв. ред. В. Н. Чебров. — Обнинск: ГС РАН, 2011. — С. 347-351. [Белосохов и др., 2011].

20. *Бобков А. Е.* Историческая реконструкция и научно-техническая визуализация на основе виртуального глобуса. В сб.: XVIII годичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН: Москва, Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, 17–19 апреля 2012 г.: Труды конференции, Т. II / Отв. ред. Ю. М. Батурин. — М.: Янус-К, 2012. — С. 845-848. [Бобков, 2012].

21. *Бобков А. Е.* Интерактивная визуализация 3D-данных на виртуальном глобусе в стереоскопических системах // Дис. ... канд. тех. наук: 05.01.01. — Нижний Новгород, ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», 2013. — 149 с. [Бобков, 2013а].

22. *Бобков А. Е.* Навигация и взаимодействие в виртуальном окружении: современные подходы // Институт истории естествознания и

техники им. С. И. Вавилова РАН. Годичная научная конференция (2013). Т. 2. — М.: ЛЕНАНД, 2013. — С. 380-384. [Бобков, 2013б].

23. *Бобков А. Е., Леонов А. В.* Процедурная реконструкция территорий на виртуальном глобусе // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2015. — № 11. — С. 10-17. [Бобков, Леонов, 2015].

24. *Бобков А. Е., Леонов А. В.* Виртуальный глобус: история и современность // Научная визуализация. — 2017. — № 2. — С. 49-63. [Бобков, Леонов, 2017].

25. *Бобков А. Е., Казанский И. П., Клименко С. В., Леонов А. В.* Исследование и разработка методов создания и изменения интерактивных трехмерных геоцентрических моделей рельефа в системах виртуального окружения. В сб.: Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. Том 2 / М.: МФТИ, 2010. [Бобков и др., 2010].

26. *Бобков А. Е., Леонов А. В., Чебров В. Н.* Визуализация сейсмических данных на виртуальном глобусе // Научная визуализация. — 2012. — № 4. — С. 30-43. [Бобков и др., 2012а].

27. *Бобков А. Е., Леонов А. В., Чебров В. Н.* Визуализация сейсмических данных на виртуальном глобусе. В сб.: ГрафиКон'2012: 22-я Международная конференция по компьютерной графике и зрению: Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова, 1-5 октября 2012 г.: Труды конференции. — М.: МАКС Пресс, 2012. — С. 163-168. [Бобков и др., 2012б].

28. *Бобков А. Е., Пуртов И. С., Шуров А. И., Щербинин Д. Ю.* Виртуальная реконструкция истории космических полетов советских/российских пилотируемых кораблей // Вопросы истории естествознания и техники. — 2013. — № 4. — С. 138-144. [Бобков и др., 2013].

29. *Бобков А. Е., Леонов А. В., Рысь И. В.* Прототип виртуального музея истории техники на WebGL. В сб.: Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция (2016) / Отв.

ред. Р. В. Артеменко. — М.: ИИЕТ РАН, 2016. — С. 280-283. [Бобков и др., 2016].

30. *Бородкин Л. И., Жеребятьев Д. И.* Технологии 3D-моделирования в исторических исследованиях: от визуализации к аналитике // Историческая информатика. — 2012. — № 2. — С. 49–63. [Бородкин, Жеребятьев, 2012].

31. *Бороздин А. К.* Еще о Пушкине и фонографе. Новое время, № 8488 от 14 октября 1899 г. [Бороздин, 1899].

32. *Виноградов К., Степанов Д.* «3D-портрет» Шуховской башни // Архитектура, реставрация, дизайн и строительство. — 2011. — № 3 (49). — С. 74-75. [Виноградов, Степанов, 2011].

33. Виртуальная археология: материалы Первой международной конференции, состоявшейся в Государственном Эрмитаже 4-6 июня 2012 г. СПб: Изд-во Государственного Эрмитажа, 2013. — 340 с. [Виртуальная археология..., 2013].

34. Виртуальная археология: материалы Второй международной конференции, состоявшейся в Государственном Эрмитаже 1–3 июня 2015 года. СПб.: Изд-во Государственного Эрмитажа, 2015. — 290 с. [Виртуальная археология..., 2015].

35. *Волошин В.* Крейсер «Аврора» отправят с места стоянки на ремонт // Известия, 7 февраля 2013. Режим доступа: <http://izvestia.ru/news/544398> [Волошин, 2013].

36. *Горб А. И.* Наземное лазерное сканирование // Семинар «Современные геоинформационные технологии в Харькове», 29.10.2009 г. (<http://www.panorama.kharkov.ua/events/events.htm?page=09063>) [Горб, 2009].

37. *Гранев В. В., Мамин А. Н., Кодыш Э. Н., Кузнеченко С. А., Ершов М. Н.* Техническое состояние несущих конструкций радиобашни В.Г. Шухова // Промышленное и гражданское строительство. — 2012. — №12. — С. 90-92. [Гранев и др., 2012].

38. *Грегори Р. Л.* Разумный глаз. М.: УРСС, 2003. [Грегори, 2003].

39. Гук Д. Ю., Определенов В. В. Виртуальные музеи: терминология, методология, восприятие // Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН. Годичная научная конференция (2014). С. 413-415. [Гук, Определенов, 2014].

40. Дозорцев В. А. Интеллектуальные права. Понятие. Система. Задачи кодификации. Сб. статей. – М., 2005. [Дозорцев, 2005].

41. Евграфов Е. М. Кинофотофонодокументы как исторический источник. М., 1973. [Евграфов, 1973].

42. Егорова О. В., Щербинин Д. Ю. 3D-моделирование исторического здания Московского Манежа // Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная конференция (2013). Т.2. М., 2013. С 387. [Егорова, Щербинин, 2013].

43. Еремченко Е. Н. Неогеография: особенности и возможности // В сборнике: Высокие технологии XXI века материалы конференции IX Международного форума. 2008. С. 170. [Еремченко, 2008].

44. Еремченко Е. Н. Неогеография и Situational Awareness // В сборнике: Высокие технологии - стратегия XXI века материалы конференции X Юбилейного Международного форума. 2009. С. 434-436. [Еремченко, 2009].

45. Ермолович Д. И. Методика межъязыковой передачи имен собственных. М.: Всероссийский центр переводов, 2009. 88 С.

46. Карташев М. О. Электромобиль Columbia императрицы Марии Федоровны // Режим доступа: <https://polymus.ru/ru/pop-science/blogs/channels/avtotehnika/14627/> [Карташев, 2016].

47. Ковельман Г. М. Творчество почетного академика инженера Владимира Григорьевича Шухова. — М.: Госстройиздат, 1961. — 363 с., ил. [Ковельман, 1961].

48. Ковтун В., Серебряный Ю. 3D сканирование в святых пещерах // Leica Reporter №61, сентябрь 2009 г. Периодическое издание Leica Geosystems. С. 3-5. [Ковтун, Серебряный, 2009].

49. *Корчуков А. С., Леонов А. В.* Использование технологии лазерного сканирования при создании 3D моделей и мониторинге памятников архитектуры // *Технология и организация строительного производства.* — 2013. — № 1(2). — С. 49-51. [Корчуков, Леонов, 2013].

50. *Кузин А. А.* Кино-фото-фоноархивы. М., 1960. [Кузин, 1960].

51. *Кунавин К. С.* Виртуальная реконструкция исторических памятников железнодорожного транспорта на примере Императорских поездов Александра III и Николая II // *Виртуальная археология (неразрушающие методы исследований, моделирование, реконструкции) : материалы Первой Международной конференции / Государственный Эрмитаж.* – СПб. : Изд-во Гос. Эрмитажа, 2013. – С. 287-294. [Кунавин, 2013].

52. *Леонов А. В.* Визуализация Долины Гейзеров на Камчатке в Google Earth. В сб.: *Туризм и рекреация: фундаментальные и прикладные исследования: Труды IV Международной научно-практической конференции.* МГУ имени М. В. Ломоносова, географический факультет. Москва, 28-29 апреля 2009 г. / Отв. ред. В. И. Кружалин, Ю. Н. Голубчиков. — М.: Диалог культур, 2009. — С. 596-603. [Леонов, 2009].

53. *Леонов А. В.* Систематизация названий основных объектов в районе Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* — 2012. — № 1. — Вып. № 19. — С. 215-230. [Леонов, 2012а].

54. *Леонов А. В.* Каталог основных объектов Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) / Электронное издание, номер государственной регистрации 0321200426. — М.: ИИЕТ РАН, 2012. — 217 с. Каталог доступен на сайте ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник» (<http://kronoki.ru/territory/reserve/unique/1>) и на сайте ФГБУН «Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН» (<http://www.kscnet.ru/ivs/lggp/cat/catalogue-2012.pdf>). [Леонов, 2012б].

55. **Леонов А. В.** Четыре аспекта виртуальности: документирование, визуализация, образование, шоу. В сб.: XVIII годовичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН: Москва, Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, 17–19 апреля 2012 г.: Труды конференции, Т. II / Отв. ред. Ю. М. Батурич. — М.: Янус-К, 2012. — С. 852-855. [Леонов, 2012в].

56. **Леонов А. В.** Анализ проектной документации Шуховской башни на Шаболовке и ее сравнение с современной 3D моделью // Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН. Годичная научная конференция (2013). Т. 2. — М.: ЛЕНАНД, 2013. — С. 390-394. [Леонов, 2013а].

57. **Леонов А. В.** Проект по трехмерному документированию Шуховской башни на Шаболовке. В сб.: Международная конференция «Великий русский инженер В.Г. Шухов и его научное наследие», посвященная 160-летию юбилею со дня рождения В.Г. Шухова, Москва, 25-27 ноября 2013 г. (ИИЕТ РАН, ИПМех РАН): Труды конференции / Отв. ред. Ф. Л. Черноусько, Ю. М. Батурич. — М.: ИПМех РАН, 2013. — С. 46-47. [Леонов, 2013б].

58. **Леонов А. В.** Анализ различий между исторической документацией и фактической конструкцией Шаболовской радиобашни с использованием 3D-модели // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2014. — № 6. — С. 15-22. [Леонов, 2014а].

59. **Леонов А. В.** Включение 3Д-документов в электронный документооборот: проблемы и перспективы. В сб.: Документация в информационном обществе: эффективное управление электронными документами. Доклады и сообщения на XX Международной научно-практической конференции 20-21 ноября 2013 г. (Росархив, ВНИИДАД) / Отв. ред. М. В. Ларин. — М.: ООО Издательско-полиграфическое объединение «У Никитских ворот», 2014. — С. 348-351. [Леонов, 2014б].

60. **Леонов А. В.** Виртуальная история науки и техники // Наука та наукознавство — Наука и науковедение — Science and Science of Science (ISSN 0374-3896). — 2014. — № 2. — С. 122-128. [Леонов, 2014в].

61. **Леонов А. В.** Применение методических рекомендаций Минкультуры России для разработки виртуального музея истории науки и техники. В сб.: VIII Международная научно-практическая конференция «История техники и музейное дело», Москва, 2-4 декабря 2014 г. (материалы) / Отв. ред. Р. В. Артеменко. — М.: ИИЕТ РАН, 2014. — С. 62. [Леонов, 2014г].

62. **Леонов А. В.** Интерактивная трехмерная визуализация памятников науки и техники в Интернете. В сб.: История науки и техники в свидетельствах и памятниках: Материалы науч. конф., Москва, 24 апреля 2014 г. / Отв. ред. С. С. Илизаров. — М.: ИИЕТ РАН, 2014. — С. 7-8. [Леонов, 2014д].

63. **Леонов А. В.** О результатах проекта «Виртуальная Долина гейзеров». В сб.: Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника. Выпуск 3 / Отв. ред. А. П. Никаноров. — Воронеж: ООО «СТП», 2014. — С. 216-227. [Леонов, 2014е].

64. **Леонов В. Л.** Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014 (Вып. 23). № 1. С. 7–14. [Леонов, 2014ж].

65. **Леонов А. В.** Малоизвестные особенности конструкции Шаболовской радиобашни: историко-технический анализ. В сб.: Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, 2015, Т.2 / Отв. ред. Ю. М. Батулин. — М.: ИИЕТ РАН, 2015. — С. 466-470. [Леонов, 2015а].

66. **Леонов А. В.** Историко-технический анализ малоизвестных особенностей конструкции Шаболовской радиобашни // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2015. — № 5. — С. 4-9. [Леонов, 2015б].

67. **Леонов А. В.** Виртуальная модель Шуховской башни на Шаболовке. В сб.: Гений В.Г. Шухова и современная эпоха. Материалы международного конгресса, Москва, 17-18 апреля 2014 г. / Отв. ред. Н.Г. Багдасарьян, Е.А. Гаврилина. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. — С. 132-136. [Леонов, 2015в].

68. **Леонов А. В.** Виртуальный музей науки и техники: настоящее и будущее // Вопросы истории естествознания и техники. — 2015. — Т. 36. — № 4. — С. 783–795. [Леонов, 2015г].

69. **Леонов А. В.** Применение 3D-технологий в истории науки и техники. 3D-модель как историко-технический источник. В сб.: Междисциплинарные методы в изучении истории науки и техники: Материалы науч. конф., Москва, 27 мая 2015 г. / Отв. ред. Ю. М. Батулин. — М.: ИИЕТ РАН, 2015. — С. 42-45. [Леонов, 2015д].

70. **Леонов А. В.** 3D-документы в музейной экспозиции: виртуальная реальность и веб-приложения. В сб.: Виртуальная археология (эффективность методов) : материалы Второй Международной конференции, Санкт-Петербург, 1–3 июня 2015 г. / Отв. ред. Д. Ю. Гук. — СПб.: Изд-во Гос. Эрмитажа, 2015. — С. 240-249. [Леонов, 2015е].

71. **Леонов А. В.** «Серьезные игры» ФСК ЕЭС // «Промышленный еженедельник», № 21 (564), 15-21 июня 2015 г. [Леонов, 2015ж].

72. **Леонов А. В.** Трехмерный документ как историко-технический источник. В сб.: История науки: источники, памятники, наследие: вторые чтения по историографии и источниковедению истории науки и техники : Материалы науч. конф., Москва, 19-20 октября 2016 г. / Отв. ред. С. С. Илизаров. — М.: ИИЕТ РАН, 2016. — С. 133–138. [Леонов, 2016].

73. **Леонов А. В.** Каталог гейзеров Кроноцкого заповедника. Долина гейзеров и кальдера вулкана Узон: история и современность. — М.: Издательство ООО «Реарт», 2017. — 384 с., ил. [Леонов, 2017].

74. **Леонов А. В., Аникушкин М. Н.** Лазерное сканирование крейсера «Аврора» и скульптуры «Родина-мать зовет!»: цифровое сохранение

советских символов. В сб.: Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция (2016) / Отв. ред. Р. В. Артеменко. — М.: ИИЕТ РАН, 2016. — С. 104-110. [Леонов, Аникушкин, 2016].

75. *Леонов А. В., Батулин Ю. М.* 3D документ — новый тип научно-технической документации // Вестник архивиста. — 2013. — № 2. — С. 192-205. [Леонов, Батулин, 2013].

76. *Леонов А. В., Бобков А. Е.* 3D-документы и виртуальная реальность в музейной экспозиции. В сб.: Объединенная международная научно-практическая конференция «Электронный век культуры» и «EVA 2013 Москва», Москва, 20–21 ноября 2013 г.: Труды конференции / РГБ, 2013. Режим доступа: <https://eva.rsl.ru/ru/2013/report/list/1204> (10.04.2017). [Леонов, Бобков, 2013].

77. *Леонов А. В., Бобков А. Е.* Актуальные вопросы применения 3D-документов для создания виртуальных музеев. В сб.: Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, 2014 / Отв. ред. Ю. М. Батулин. — М.: ЛЕНАНД, 2014. — С. 415-419. [Леонов, Бобков, 2014].

78. *Леонов А. В., Бобков А. Е., Еремченко Е. Н.* 3D-документирование территории для систем виртуальной реальности // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2012. — № 9. — С. 13-17. [Леонов и др., 2012].

79. *Леонов А. В., Рысь И. В.* Вопросы применения технических рекомендаций Минкультуры России для разработки виртуального музея истории науки и техники. В сб.: История техники и музейное дело: материалы VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 2-4 декабря 2014 г. / Отв. ред. Р. В. Артеменко. — М.: ИИЕТ РАН, 2015. — С. 362-367. [Леонов, Рысь, 2015].

80. *Леонов А. В., Серебров А. А., Алейников А. А., Дроздин В. А., Еремченко Е. Н., Казанский И. П., Клименко А. С., Клименко С. В., Леонов*

В. Л., Леонова В. Ф., Самойленко С. Б., Уразметов В. Ф., Фролов П. В., Шпиленок Т. И. Создание виртуальной модели Долины Гейзеров с использованием технологий неогеографии и виртуального окружения. В сб.: Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть IV. Молекулярная и биологическая физика. Том 1 / М.: МФТИ, 2009. — С. 77-79. [Леонов и др., 2009].

81. **Леонов А. В., Серебров А. А., Алейников А. А., Аникушкин М. Н., Белосохов Д. Е., Дроздин В. А., Еремченко Е. Н., Казанский И. П., Клименко А. С., Клименко С. В., Леонов В. Л., Леонова В. Ф., Рашидов А. В., Самойленко С. Б., Уразметов В. Ф., Фролов П. В., Шпиленок Т. И.** Виртуальное природное наследие: 3D-модель Долины Гейзеров. В сб.: Туризм и рекреация: фундаментальные и прикладные исследования: Труды V Международной научно-практической конференции. МГУ имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Москва, 28-29 апреля 2010 г. / Отв. ред. В. И. Кружалин, М. Н. Ломоносов. СПб: Д.А.Р.К, 2010. — С. 194-201. [Леонов и др., 2010].

82. **Леонов А. В., Алейников А. А., Бобков А. Е., Еремченко Е. Н., Клименко А. С., Фролов П. В.** Виртуальное моделирование территории на основе данных дистанционного зондирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 2. — С. 46-52. [Леонов и др., 2011].

83. **Леонов А. В., Батурин Ю. М., Петропавловская И. А.** О необходимости 3D документирования памятников техники: пример Шуховской башни на Шаболовке // Вопросы истории естествознания и техники. — 2013. — № 3. — С. 156-170. [Леонов и др., 2013].

84. **Леонов А. В., Аникушкин М. Н., Бобков А. Е., Рысь И. В., Козликин М. Б., Шуньков М. В., Деревянко А. П., Батурин Ю. М.** Создание виртуальной 3D-модели Денисовой пещеры // Археология, этнография и антропология Евразии. 2014. № 3. — С. 14-20. [Леонов и др., 2014].

85. М. В. Ломоносов и академические экспедиции XVIII века. Авторы-составители О.А. Александровская, В.А. Широкова, О.С. Романова, Н.А. Озерова. – М., «РТСофт», 2011. – 272 с. [М. В. Ломоносов..., 2011].

86. *Магидов В. М.* К вопросу об особенностях кинофотофонодокументов как массовых источников // Массовые документы и проблемы архивоведения. М., 1986. [Магидов, 1986].

87. *Магидов В. М.* Кинофотофонодокументы: проблемы историографии, архивоведения и источниковедения // Автореф. дис. ... докт. ист. наук: 07.00.09. — М., РГГУ, Историко-архивный институт, 1993. — 36 с. [Магидов, 1993].

88. *Магидов В. М.* Технотронное архивоведение и источниковедение на современном этапе: научные и педагогические приоритеты // Вестник архивиста. 2014. № 2. [Магидов, 2014].

89. *Медведев Ю.* Шухова вписали в цифру. В Госархив впервые передан 3D-документ / «Российская газета» - Столичный выпуск №6236 (260), 19.11.2013. Режим доступа: <https://rg.ru/2013/11/13/bashnya-site.html> [Медведев, 2013].

90. *Михайлюк М. В., Торгашев М. А.* Моделирование и распределенная стерео визуализация Международной космической станции в режиме реального времени // XVIII годовичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН: Москва, Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 17–19 апреля 2012 г.: Труды конференции, Т. II. — М.: Янус-К, 2012. — С. 859-860. [Михайлюк, Торгашев, 2012].

91. *Набоко С. И.* Гейзеры Камчатки // Труды Лаборатории вулканологии. М.: Изд. АН СССР, 1954. Вып. 8. С. 126-209.

92. *Петропавловская И. А.* Шаболовская башня в Москве (1919–2013). (Проекты реконструкции) // Годичная научная конференция, посвященная 120-летию со дня рождения С.И. Вавилова. ИИЕТ им. С. И. Вавилова РАН (2011). М.: Изд-во «Янус–К», 2011, с. 560–563. [Петропавловская, 2011].

93. *Пилдре Л.* Виртуальные пещеры // *Leica Reporter* №64, сентябрь 2011 г. Периодическое издание Leica Geosystems. С. 6-7. [Пилдре, 2011].

94. Правила русской орфографии и пунктуации. Полный академический справочник / Под ред. В. В. Лопатина. М.: Эксмо, 2007. 480 С. [Правила..., 2007]

95. «Родина-мать» накренилась на 211 миллиметров // *Взгляд*. 6 мая 2009 г. Режим доступа: <http://vz.ru/news/2009/5/6/284249.html> [Родина-мать..., 2009].

96. *Рыбкина А. И., Бобков А. Е., Никифоров О. В., Пятыгина О. О.* Программно-аппаратный комплекс для визуализации геофизических данных на сферическом экране // *Научная визуализация*. — 2015. — Т.7. — № 2. — С. 38-49. [Рыбкина и др., 2015].

97. *Рысь И. В., Леонов А. В.* Методы виртуальной реконструкции памятников техники: мировой опыт. В сб.: *Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция (2016) / Отв. ред. Р. В. Артеменко*. — М.: ИИЕТ РАН, 2016. — С. 720-721. [Рысь, Леонов, 2016].

98. *Рысь И. В., Бобков А. Е., Карташев М. О., Леонов А. В.* 3D-моделирование электромобиля Columbia (1901) и виртуальная реконструкция утраченных механических элементов. В сб.: *IX Международная научно-практическая конференция «История техники и музейное дело», Москва, 1-3 декабря 2015 г. (материалы) / Отв. ред. Р. В. Артеменко*. — М.: ИИЕТ РАН, 2015. — С. 15. [Рысь и др., 2015a].

99. *Рысь И. В., Карташев М. О., Леонов А. В.* Виртуальная реконструкция электромобиля Columbia (1901): методика 3D-моделирования и первые результаты. В сб.: *Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, 2015, Т.1 / Отв. ред. Ю. М. Батурин*. — М.: ИИЕТ РАН, 2015. — С. 434-439. [Рысь и др., 2015b].

100. *Рысь И. В., Бобков А. Е., Карташев М. О., Леонов А. В.* 3D-моделирование электромобиля Columbia (1901) и виртуальная реконструкция

утраченных механических элементов. В сб.: История техники и музейное дело: материалы IX Международной научно-практической конференции. 1-3 декабря 2015 г. / Отв. ред. Р. В. Артеменко. — М.: ИИЕТ РАН, 2016. — С. 26-29. [Рысь и др., 2016].

101. Система практической транскрипции русского текста латинским алфавитом BGN, 1944. <http://earth-info.nga.mil/gns/html/romanization.html> [Система..., 1944]

102. Система практической транскрипции русского текста латинским алфавитом PCGN, 1947. http://www.pcgng.org.uk/Romanisation_systems.htm [Система..., 1947]

103. Сканирование Ближних пещер Киево-Печерской лавры. Режим доступа: <http://www.kmcgeo.com/Topoworks/2007-scan-pech.htm> (просмотрено 18.01.2014). [Сканирование..., 2007].

104. *Стивенсон Н.* Лавина. — АСТ, Ермак, 2003. — 480 с. [Стивенсон, 2003].

105. *Страбон.* География. Цит. по: Страбон. «География». — М., «Наука», 1964. [Страбон].

106. *Сугробов В. М., Сугрובה Н. Г., Карнов Г. А., Леонов В. Л.* Жемчужина Камчатки – Долина Гейзеров. М., 2004. 212 с. Электронное издание (адрес: <http://andreyleonov.ru/Book2004.pdf>).

107. *Сугробов В. М., Сугрובה Н. Г., Дроздин В. А., Карнов Г. А., Леонов В. Л.* Жемчужина Камчатки – Долина гейзеров. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с. В электронном виде книга доступна по адресу: <http://andreyleonov.ru/Book2009.pdf> [Сугробов и др., 2009].

108. Технические рекомендации по созданию виртуальных музеев. М.: Мин-во культуры РФ, 2014. <https://www.mkrf.ru/documents/po-sozdaniyu-virtualnykh-muzeev-250714/>. [Технические рекомендации..., 2014].

109. *Устинова Т. И.* Камчатские гейзеры. Москва: Государственное издательство географической литературы, 1955. 120 с.

110. *Хакен Г., Хакен-Крелль М.* Тайны восприятия. Синергетика как ключ к мозгу. — М.: Институт компьютерных исследований, 2002. [Хакен, Хакен-Крелль, 2002].

111. Хартия о сохранении цифрового наследия. Принята на 32-й Генеральной конференции ЮНЕСКО. Париж, Франция, октябрь 2003. [Хартия..., 2003].

112. Хорографическая чертежная книга Сибири С.У.Ремезова. — Тобольск, Общественный благотворительный фонд «Возрождение Тобольска», 2011. - 693 с. [Хорографическая чертежная книга ..., 2011].

113. *Шилов Л. А.* Голоса, зазвучавшие вновь. Записки звукоархивиста-шестидесятника. М.: Альдаон, 2004. 368 С. [Шилов, 2004].

114. *Шухардин С. В.* Основы истории техники. М., 1961. [Шухардин, 1961].

115. Шухов В. Г. (1853-1939). Искусство конструкции: Пер. с нем. / Под. ред. Р. Грефе, М. Гаппоева, О. Перчи. — М.: Мир, 1995. — 192 с., ил. [Шухов..., 1995].

116. *Шухова Е. М.* Труды и дни инженера В.Г.Шухова // Наше наследие. — 2004. — № 70. — С. 82-98. [Шухова, 2004].

117. *Щербинин Д. Ю.* Опыт и перспектива использования виртуальных образцов техники в музейно-выставочной деятельности / В сб.: Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, 2014 / Отв. ред. Ю. М. Батурин. — М.: ЛЕНАНД, 2014. — С. 419-420. [Щербинин, 2014].

Литература на иностранных языках

118. 3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage / Ed. by E. Stylianidis and F. Remondino. — Dunbeath, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2016. — 388 p. [3D Recording..., 2016].

119. *Abbott, M., and Anderson-Whymark, H.* Stonehenge Laser Scan: Archaeological Analysis Report. English Heritage Project 6457. Research Report Series no. 32-2012. [Abbott, Anderson-Whymark, 2012].
120. *Agrawal, G. P.* Lightwave Technology: Telecommunication Systems. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005. [Agrawal, 2005].
121. *Angus, W.* Stocking. Scanning the “Black Dragon” // LiDAR, 2014, V. 4, No. 8, P. 13-18. [Angus, 2014].
122. *Anikushkin, M., Bobkov, A., and Leonov, A.* A 3D Documentation Project in Russia: Data Capture, Modeling and Representation // GeoInformatics Magazine (ISSN 1387-0858). — 2013. — September (No. 6). — P. 38-39. [Anikushkin et al., 2013].
123. *Anikushkin, M., and Leonov, A.* 3D Modelling of Shukhov Tower // GIM International (ISSN 1566-9076). — 2014 (Vol. 28). — July (No. 7). — P. 22-25. [Anikushkin, Leonov, 2014a].
124. *Anikushkin, M., and Leonov, A.* Modelado 3D de la Torre de Shújov // GIM International — Spanish edition (ISSN 1566-9076). — 2014 (Vol. 1). — August (No. 2). — P. 22-25. [Anikushkin, Leonov, 2014b].
125. *Bawaya M.* Virtual Archaeologists Recreate Parts of Ancient Worlds // Science. – 2010. – Vol. 327, N 5962. – P. 140–141. [Bawaya, 2010].
126. *Beraldin, J.-A. et al.* Multi-Resolution Digital 3D Imaging System Applied to the Recording of the Grotta dei Cervi // Proc. of VAST 2006, P. 45-52. DOI: 10.2312/VAST/VAST06/045-052. [Beraldin et al., 2006].
127. *Beraldin, J.-A. et al.* Best Practices for the 3D Documentation of the Grotta dei Cervi of Porto Badisco, Italy // Proc. SPIE 7864, Three-Dimensional Imaging, Interaction, and Measurement, 78640J (January 27, 2011). DOI:10.1117/12.871211. [Beraldin et al., 2011].
128. *Billaud, Y., Chazaly, B., Olive, M., and Vanrell, L.* Acquisition 3D et documentation multiscalaire de la grotte Cosquer: une reponse aux difficultes d'accès et a une submersion ineluctable? // CARSTOLOGIA 64, 2014, pp. 7-16. [Billaud et al., 2014].

129. *Bruneton, E., Neyret, F.* Real-time rendering and editing of vector-based terrains. *Comput. Graph. Forum*, (2008) 27 (2). [Bruneton, Neyret, 2008].
130. *Bruneton, E., Neyret, F.* Real-time Realistic Rendering and Lighting of Forests, *Comput. Graph. Forum*, (2012) 29 (2). [Bruneton, Neyret, 2012].
131. *Bryan, T. S.* *The Geysers of Yellowstone*. 4th edition, University Press of Colorado, Boulder. 2008. [Bryan, 2008].
132. *Buckley, S. J., Vallet, J., Braathen, A., and Wheeler, W.* Oblique helicopter-based laser scanning for digital terrain modeling and visualisation of geological outcrops // *Archives of ISPRS*. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing 2008. – pp. 493-498. [Buckley et al., 2008].
133. *Cavazza M., Charles F., Mead S. J.* Character-based interactive storytelling // *IEEE Intelligent systems*. – 2002. – T. 17. – №. 4. – C. 17-24. [Cavazza et al., 2002].
134. *Chandelier, L., and Roche, R.* Terrestrial laser scanning for paleontologists: the Tautavel cave // *Proc. of the XXII CIPA Symposium, Kyoto, Japan, October 11-15, 2009*. [Chandelier, Roche, 2009].
135. *Charsky D.* From edutainment to serious games: A change in the use of game characteristics // *Games and culture*. – 2010. – T. 5. – №. 2. – C. 177-198. [Charsky, 2010].
136. *Chen, B., Huang, F., Lin, H., and Hu, M.* VCUHK: integrating the real into a 3D campus in networked virtual worlds // *Proc. of 2010 International Conference on Cyberworlds*. – IEEE CS CPS, 2010. – pp. 302-308. [Chen et al., 2010].
137. *Cheves, M.* *Smithsonian X3D // LiDAR Magazine*. 2014. Vol. 4. No. 3. P. 16–22. [Cheves, 2014].
138. *Columbia electric motor carriages // The Electrical Engineer*. Vol. XXVI. No. 534, July 28, 1898. P. 80-81. [Columbia..., 1898a].
139. *Columbia Motor Vehicles // The Horseless Age*. A monthly journal devoted to motor interests. Vol III. New York, October, 1898. No. 7. P. 30-38. [Columbia..., 1898b].

140. *Cozzi, P., and Ring, K.* 3D Engine Design for Virtual Globes. — CRC Press, 2011. — 520 P. — ISBN: 1568817118. [Cozzi, Ring, 2011].
141. *Crawford C.* Chris Crawford on interactive storytelling. — New Riders, 2012. [Crawford, 2012].
142. *Danilicheva P. et al.* Education in virtual worlds: Virtual storytelling //CyberWorlds, 2009. CW'09. International Conference on. — IEEE, 2009. — C. 333-338. [Danilicheva et al., 2009].
143. *Delannoy, J.-J., Sadier, B., Valcke, S., Peral, J., Perazio, G., Jaillet, S., Tosello, G., Geneste, J.-M., and Glottes, J.* La modelisation 3D, outil de transfert des connaissances. Exemple de la réplique de la grotte Chauvet Pont d'Arc: la caverne du Pont d'Arc (Ardeche, France) // CARSTOLOGIA 64, 2014, pp. 41-57. [Delannoy et al., 2014].
144. *Deng, B., Guo, H., Wang, C., and Nie, Y.* Remote sensing analysis of the status of the Beijing-Hangzhou Grand Canal // Archives of ISPRS. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008. — pp. 231-236. [Deng et al., 2008].
145. Digital Applications For Cultural And Heritage Institutions / James Hemsley, Vito Cappellini, and Gerd Stanke, Eds. // Ashgate Pub Ltd, 2005. — 305 p. [Digital Applications..., 2005].
146. *Domingo, I. et al.* Latest developments in rock art recording: towards an integral documentation of Levantine rock art sites combining 2D and 3D recording techniques // Journal of Archaeological Science, April 2013, Volume 40, Issue 4, P. 1879–1889. [Domingo et al., 2013].
147. *Donelan, J.* Making Prehistory // Computer Graphics World. — 2002. — Vol. 25, N 3. — P. 32–33. [Donelan, 2002].
148. *Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., and Liston, K.* BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. 2nd Edition. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA. 2011. 648 p. [Eastman et al., 2011].

149. *El-Hakim, S. et al.* Modelling and visualization of aboriginal rock art in the Baiame cave // ISPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 35(5): 990-995. [El-Hakim et al., 2004].
150. Encyclopedia of GIS / Shekhar S., Xiong H. (eds.). – Springer Science & Business Media, 2008. [Encyclopedia..., 2008].
151. *Endsley M. R.* Toward a theory of situation awareness in dynamic systems // Human factors. – 1995. – T. 37. – №. 1. – C. 32-64. [Endsley, 1995].
152. *Fellner, D. W., Saupe, D., and Krottmaier, H.* Guest Editors' Introduction: 3D documents // IEEE Computer Graphics and Applications, July/August 2007. – IEEE CS PS. - pp. 20-21. [Fellner et al., 2007].
153. *Freeth, T. et al.* Decoding the Antikythera Mechanism: Investigation of an Ancient Astronomical Calculator // Nature, Volume 444, Issue 7119, pp. 587-591 (2006). [Freeth et al., 2006].
154. *Fryer, J. G. et al.* Recording and modelling an aboriginal cave painting: with or without laser scanning // ISPRS Archives. Vol. XXXVI-5/W17, 2005. [Fryer et al., 2005].
155. *González-Aguilera, D., Muñoz-Nieto, A., Gómez-Lahoz, J., Herrero-Pascual, J., and Gutierrez-Alonso, G.* 3D Digital Surveying and Modelling of Cave Geometry: Application to Paleolithic Rock Art // Sensors. – 2009. – N 9. – P. 1108–1127. [González-Aguilera et al., 2009].
156. *Gore, A.* The Digital Earth: Understanding our planet in the 21st Century. 1998. (http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=6210) [Gore, 1998].
157. *Green, W. B.* Introduction to Electronic Document Management Systems. Published by Academic Press, Inc., San-Diego, California, USA. 1993. 250 p. [Green, 1993].
158. *Grussenmeyer, P. et al.* High resolution 3D recording and modeling of the Bronze Age cave “Les Fraux” in Perigord (France) // Proc. of the ISPRS Commission V Mid-Term Symposium on Close Range Image Measurement

Techniques, Volume XXXVIII, Newcastle upon Tyne, UK, P. 262-267, 2010. [Grussenmeyer et al., 2010].

159. *Harmsworth, A. C.* Motors and Motor-Driving / London: Longmans, Green and Co., 1902. 456 p. [Harmsworth, 1902].

160. *Havemann, S. et al.* The Arrigo Showcase Reloaded — towards a sustainable link between 3D and semantics // Journal on Computing and Cultural Heritage, 2009, Vol. 2, Issue 1, p. 1-13. [Havemann et al., 2009].

161. *Krause, J., Fu, Q., Good, J. M., Viola, B., Shunkov, M. V., Derevianko, A. P., and Pääbo, S.* The complete mitochondrial DNA genome of an unknown hominin from southern Siberia // Nature. № 464 (8 April 2010). P. 894-897. [Krause et al. 2010].

162. *Lagae, A., Lefebvre, S., Coor, R., Derose, T., Drettakis, G., Ebert, D. S., Lewis, J.P., Perlin, K., and Zwicker, M.* State of the Art in Procedural Noise Functions // In EG 2010-State of the Art Reports. 2010. [Lagae et al., 2010].

163. *Leonov, A.* Virtual Valley of Geysers // The Geyser Gazer Sput. The Newsletter of The Geyser Observation and Study Association (ISSN 1524-5497). — 2012 (Vol. 26). — February (No. 1). — P. 12-15. [Leonov, 2012].

164. *Leonov, A.* Cataloging of Geysers in Kamchatka's Valley of Geysers // The Geyser Gazer Sput. The Newsletter of The Geyser Observation and Study Association (ISSN 1524-5497). — 2013 (Vol. 27). — February (No. 1). — P. 9-18. [Leonov, 2013].

165. *Leonov, A. V.* History of Cartography and Toponymy of the Valley of Geysers (Kronotsky Reserve, Kamchatka Peninsula, Russia): From Field Drawings to 3-D Documents // The Cartographic Journal. DOI: 10.1080/00087041.2017.1414020. In press. [Leonov, 2017].

166. *Leonov, A., and Anikushkin, M.* Preserving Technological Monuments in Russia // GIM International (ISSN 1566-9076). — 2016 (Vol. 30). — July (No. 7). — P. 23-25. [Leonov, Anikushkin, 2016].

167. *Leonov, A., and Hobart, J.* The Valley of the Geysers — Twenty Years After the GOSA Expedition // The Geyser Gazer Sput. The Newsletter of The

Geyser Observation and Study Association (ISSN 1524-5497). — 2011 (Vol. 25). — December (No. 6). — P. 17-18. [Leonov, Hobart, 2011].

168. *Leonov, A., and Kotelnikov, S.* Game on with laser scanning // Reporter 76 (Периодическое издание Leica Geosystems). — August 2016. — P. 31-33. [Leonov, Kotelnikov, 2016].

169. *Leonov, A., and Leonov, V.* Valley of Geysers, Kronotsky Reserve, Kamchatka: Features Seen by the 1991 GOSA Expedition and Changed by the 2007 Landslide, 2013 Cyclone and 2014 Landslide // The Geyser Gazer Sput. The Newsletter of The Geyser Observation and Study Association (ISSN 1524-5497). — 2014 (Vol. 28). — April (No. 2). — P. 5–26. [Leonov, Leonov, 2014].

170. *Leonov, A. et al.* Virtual story in cyberspace: Valley of Geysers, Kamchatka. Proc. of 2010 International Conference on Cyberworlds, Singapore, 20-22 October 2010 / Ed. by Alexei Sourin and Olga Sourina. IEEE CS CPS, 2010. – DOI 10.1109/CW.2010.42 — P. 247-253. [Leonov et al., 2010].

171. *Leonov, A., Aleynikov, A., Belosokhov, D., Bobkov, A., Eremchenko, E., Frolov, P., Klimenko, A., and Klimenko, S.* 3D Documentation of Natural Heritage for Virtual Environments and Web — Case Study: Valley of Geysers, Kamchatka. Proc. of the IADIS International Conference CGVVCVIP 2011, Rome, Italy, 20-26 July 2011 / Ed. by Yingcai Xiao. IADIS Press, 2011. — ISBN: 978-972-8939-48-9 — P. 255-259. [Leonov et al., 2011].

172. *Leonov, A.V., Anikushkin, M. N., Ivanov, A. V., Ovcharov, S. V., Bobkov, A.E., and Baturin, Y. M.* Laser Scanning and 3D Modeling of the Shukhov Hyperboloid Tower in Moscow // Journal of Cultural Heritage. — 2015. — Volume 16, Issue 4. — P. 551–559. [Leonov et al., 2015].

173. *Leonov, A., Anikushkin, M., and Buynov, A.* Serious Gaming for Facility Management // GIM International (ISSN 1566-9076). — 2016 (Vol. 30). — September (No. 9). — P. 20-23. [Leonov et al., 2016].

174. *Lerma, J., Navarro, S., Cabrelles, M., and Villaverde, V.* Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study // J. of

Archaeological Science. – 2010. – Vol. 37, N 3. – P. 499–507. [Lerma et al., 2010].

175. *Mao, F., Liu, Z., Zhou, W., Huang, J., and Li, Q.* The research and application of spatial information technology in cultural heritage conservation – case study on Grand Canal of China // Archives of ISPRS. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008. – pp. 999-1005. [Mao et al., 2008].

176. *Marczewski, A.* Gamification: A Simple Introduction & a Bit More. USA: Amazon Digital Service, 2012. [Marczewski, 2012].

177. *Menna, F. et al.* High Resolution 3D Modeling of the Behaim Globe // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5, p. 115-120 (2012). [Menna et al., 2012].

178. *Mill, H. R.* The Siege of the South Pole. Alston Rivers, London, 1905. [Mill, 1905].

179. *Morwood, M. J. et al.* Archaeology and age of a new hominin from Flores in eastern Indonesia // Nature 431: 1087–1091. doi:10.1038/nature02956. [Morwood, 2004].

180. *Möser, S., Wahl, R., and Klein, R.* Out-of-core topologically constrained simplification for city modeling from digital surface models // Archives of ISPRS. Volume XXXVIII-5/W1. Trento 2009. [Möser et al., 2009].

181. *Okan Z.* Edutainment: is learning at risk? //British Journal of Educational Technology. – 2003. – T. 34. – №. 3. – C. 255-264. [Okan, 2003].

182. *Re, A. de la, Abad, F., Camahort, E., and Juan, M.* Tools for procedural generation of plants in virtual scenes // Computational Science–ICCS. 2009. [Re et al., 2009].

183. *Reilly, P.* Towards a virtual archaeology // Computer Applications in Archaeology, edited by K. Lockyear and S.P.Q. Rahtez. – Oxford: Archaeopress (British Archaeological Reports, International Series No. 565), 1990. – P. 133–139. [Reilly, 1990].

184. *Reinhard E., Ward G., Pattanaik S., and Debevec P.* High Dynamic Range Imaging / Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2005. 520 p. [Reinhard et al., 2005].

185. *Remondino, F. and Rizzi, A.* Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites — techniques, problems, and examples // *Applied Geomatics*, 2010, Vol. 2, No. 3, pp. 85-100. [Remondino, Rizzi, 2010].

186. *Rosenblum L. et al.* Scientific visualization. – Academic Press, 1994. – №. VRLAB-BOOK-2007-014. [Rosenblum et al., 1994].

187. *Rüther, H., Chazan, M., Schroeder, R., Neeser, R., Held, C., Walker, S. J., Matmon, A., and Horwitz, L. K.* Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the case study of Wonderwerk Cave, South Africa // *J. of Archaeological Science*. – 2009. – Vol. 36, N 9. – P. 1847–1856. [Rüther et al., 2009].

188. *Smelik, R. M.* A Declarative Approach to Procedural Generation of Virtual Worlds // Ph.D. thesis. 2011. [Smelik, 2011].

189. *Stal, C. et al.* Digital Representation of Historical Globes: Methods to Make 3D and Pseudo-3D Models of 16th Century Mercator Globes // *The Cartographic Journal*, 49(2), 107-117 (2012). [Stal et al., 2012].

190. *Stanton N. A., Chambers P. R. G., Piggott J.* Situational awareness and safety // *Safety science*. – 2001. – T. 39. – №. 3. – C. 189-204. [Stanton et al., 2001].

191. *The Columbia Motor Carriage // The Horseless Age.* A monthly journal devoted to motor interests. Vol II. New York, October, 1897. No. 6. P. 1-7. [The Columbia..., 1897].

192. *Thibault, G.* 3D modeling of the Cosquer cave by laser survey // *International newsletter on rock art*. – 2001. – N 28. – P. 25–29. [Thibault, 2001].

193. *Thomas, J. C. et al.* 3D Visualisation and interaction with a Paleolithic database // *Workshop on Archaeology and Computers*, Vienna (Austria), November 2004. [Thomas et al., 2004].

194. *Turner A.* Introduction to neogeography. – O'Reilly Media, Inc., 2006. [Turner, 2006].

195. *Unver, E., and Taylor, A.* Virtual Stonehenge Reconstruction // In: Progress in Cultural Heritage Preservation. Proceedings: Lecture Notes in Computer Science Subseries: Information Systems and Applications, incl. Internet/Web, and HCI , 7616 (XXV). Springer, 2012, P. 449-460. ISBN 978-3-642-34234-9. [Unver, Taylor, 2012].

196. *Urquhart, F.* Antarctic ship RSS Discovery scanned by 3D laser // The Scotsman. Thursday 14 November 2013. Режим доступа: <http://www.scotsman.com/news/antarctic-ship-rss-discovery-scanned-by-3d-laser-1-3189090> [Urquhart, 2013].

197. Virtual Globes in Science // Computers & Geosciences. 2011. Vol. 37. Issue 1 / Aijun Chen and John Bailey, Eds. – P. 1-110. [Virtual..., 2011].

198. Virtual reality systems / Earnshaw R. A. (ed.). – Academic press, 2014. [Virtual..., 2014a].

199. Virtual reality: applications and explorations / Wexelblat A. (ed.). – Academic Press, 2014. [Virtual..., 2014b]

200. *Walter, C.* World's Most Ambitious Re-Creation of Prehistoric Cave Art to Open // National Geographic, December 19, 2014. Web-address: <http://news.nationalgeographic.com/news/2014/12/141219-chauvet-paleolithic-cave-art-paintings-france-ancient-culture/> [Walter, 2014].

201. *Wells, W. D.* Generating enhanced natural environments and terrain for interactive combat simulations (genetics) // Ph.D. thesis. 2005. [Wells, 2005].

202. *Ying, Y., Behr, F.-J., and Li, H.* Design and implementation of a portal site for the Olympic Games 2008 in Beijing using Google Maps // Archives of ISPRS. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing 2008. – pp. 1793-1798. [Ying et al., 2008].

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Свид. 2015619269. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа визуализации 3D-моделей космического

эксперимента «Плазменный кристалл» / Бобков А. Е., **Леонов А. В.**; заявитель и правообладатель ИИЕТ РАН (RU). – Заявка № 2015615807; дата поступления 30.06.2015 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 27.08.2015.

2. Свид. 2015619270. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа визуализации 3D-моделей орбит космических полетов на основе виртуального глобуса» / Бобков А. Е., **Леонов А. В.**; заявитель и правообладатель ИИЕТ РАН (RU). – Заявка № 2015615806; дата поступления 30.06.2015 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 27.08.2015.

3. Свид. 2015619271. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа визуализации 3D-моделей Денисовой пещеры на Алтае» / Бобков А. Е., **Леонов А. В.**; заявитель и правообладатель ИИЕТ РАН (RU). – Заявка № 2015615805; дата поступления 30.06.2015 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 27.08.2015.

4. Свид. 2015660907. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа визуализации 3D-моделей супергидрофобных покрытий» / Бобков А. Е., **Леонов А. В.**; заявитель и правообладатель ИИЕТ РАН (RU). – Заявка № 2015615770; дата поступления 30.06.2015 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 13.10.2015.

5. Свид. 2015661073. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа визуализации 3D-моделей Шуховской башни на Шаболовке» / Бобков А. Е., **Леонов А. В.**; заявитель и правообладатель ИИЕТ РАН (RU). – Заявка № 2015615792; дата поступления 30.06.2015 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16.10.2015.

6. Свид. 2015661074. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа визуализации геофизических данных и 3D-моделей на основе полупрозрачного виртуального глобуса» / Бобков А. Е.,

Леонов А. В.; заявитель и правообладатель ИИЕТ РАН (RU). – Заявка № 2015615793; дата поступления 30.06.2015 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16.10.2015.