

УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-589-606

И.А. Рыльский<sup>1</sup>, Д.А. Парамонов<sup>2</sup>, А.Ю. Кожухарь<sup>3</sup>, А.И. Терская<sup>4</sup>

## СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАЙОНА БОЛЬШОЙ СОЧИ – КРАСНАЯ ПОЛЯНА – ПЛАТО ЛАГО-НАКИ

### АННОТАЦИЯ

Проектирование горнолыжных комплексов с учетом прилегающих территорий и их особенностей — непростой и многогранный процесс, требующий внимания не только к географическим, но и социально-экономическим аспектам региона. Наряду с оценкой в пределах горных склонов в проекте должны быть рассмотрены особенности застройки территории, ее инженерная освоенность и иные техногенные элементы антропогенного воздействия на местность. Опыт строительства подобных объектов свидетельствует о том, что высокоточные пространственные данные о территории работ востребованы всеми участниками процессов экономической оценки проекта и проектирования. Эти сведения используются для оптимизации расположения подъемников, подъездных путей, водоводов снеговых пушек, проектирования ландшафтных дизайнерских решений, отелей, ресторанов и прочей селитебной инфраструктуры. Наиболее перспективным на сегодняшний день методом геоинформационного обеспечения подобных проектов является подбор комплексных разномасштабных ГИС-данных, включая проведение лазерного сканирования с одновременным выполнением плановой и наклонной аэрофотосъемки. Впоследствии эти материалы вместе с космическими снимками высокой детальности на сопредельные территории применяются для создания виртуальных моделей с набором функций, адаптированных под нужды пользователей со средним и низким уровнем подготовки к работе с пространственными данными. На данном этапе классические полнофункциональные ГИС-пакеты обладают рядом недостатков. Наиболее частая проблема пользователей, ранее не сталкивавшихся с подобными данными — сложность в освоении. Полнофункциональные ГИС-пакеты могут быть дороги при покупке, функциональность бесплатных решений — недостаточна. Использование значительных по объему пространственных данных в ситуации, когда пользователи находятся в разных населенных пунктах требует высокоскоростного доступа в Интернет и все равно не обеспечивает желаемой производительности и гибкости. Используемый в данной работе подход к организации данных устраняет вышеуказанные недостатки. При этом нет необходимости использования сложных ГИС-пакетов. В качестве замены создаются закрытые от редактирования и доступа к исходным данным виртуальные среды. Полученная виртуальная модель территорий существующих и проектируемых элементов горнолыжных кластеров ориентирована на повышение пространственной осведомленности пользователей. Удалось реализовать функциональность и возможность использования

---

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: [rilskiy@mail.ru](mailto:rilskiy@mail.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: [paramonovwork@mail.ru](mailto:paramonovwork@mail.ru)

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: [ann3105880@yandex.ru](mailto:ann3105880@yandex.ru)

<sup>4</sup> Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Факультет космических исследований, Ленинские горы, д. 1 стр. 52, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: [arvin2@yandex.ru](mailto:arvin2@yandex.ru)

модели на обычных компьютерах в режиме сочетания высокой пространственной точности модели с ее значительным территориальным охватом (свыше 25 000 км<sup>2</sup>).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** аэрофотосъемка, виртуальная модель, лидар, ГИС

**Иля А. Rylskiy<sup>1</sup>, Dmitriy A. Paramonov<sup>2</sup>, Anna Yu. Kozhukhar<sup>3</sup>,  
Anna I. Terskaya<sup>4</sup>**

**CREATING A VIRTUAL MODEL OF THE AREA  
OF GREATER SOCHI – KRASNAYA POLYANA –  
LAGO-NAKI PLATEAU**

**ABSTRACT**

The design of ski resorts, considering the surrounding areas and their characteristics, is a complex and multifaceted process that requires taking into account not only the geographical, but also the socio-economic aspects of the region. Along with the assessment within the mountain slopes, the project should assess the features of the development of the territory, its engineering development and other technogenic elements of the anthropogenic impact on the area. Experience in the construction of such facilities indicates that high-precision spatial data on the area of work are in demand by all participants in the processes of economic evaluation of the project and design. This information is used to optimize the location of lifts, driveways, snow gun conduits, landscape design solutions, hotels, restaurants and other residential infrastructure. The most promising method of geoinformation support for such projects today is the selection of complex multi-scale GIS data, including laser scanning with simultaneous planned and inclined aerial photography. Subsequently, these materials, together with highly detailed satellite images of adjacent territories, are used to create virtual models with a set of functions adapted to the needs of users with an average and low level of training in working with spatial data. At this stage, classic full-featured GIS packages have a number of disadvantages. The most common problem for users who have not previously encountered such data is the difficulty in mastering. Full-featured GIS packages can be expensive to purchase, while free solutions don't provide enough functionality. The use of significant spatial data in a situation where users are located in different locations requires high-speed Internet access, and still does not provide the desired performance and flexibility. The approach to data organization used in this work eliminates the above disadvantages. There is no need to use complex GIS packages. As a replacement, virtual environments are created that are closed from editing and access to the source data. The resulting virtual model of the territories of existing and planned elements of ski clusters is focused on increasing the spatial awareness of users. It was possible to realize the functionality and the possibility of using the model on conventional computers in the mode of combining the high spatial accuracy of the model with its significant territorial coverage (over 25 000 km<sup>2</sup>).

**KEYWORDS:** airborne imagery, virtual model, remote sensing, GIS, LIDAR

---

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* [rilskiy@mail.ru](mailto:rilskiy@mail.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* [paramonovwork@mail.ru](mailto:paramonovwork@mail.ru)

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* [ann3105880@yandex.ru](mailto:ann3105880@yandex.ru)

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Researches, 1 build 52, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* [arvin2@yandex.ru](mailto:arvin2@yandex.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Строительство новых и развитие существующих горно-туристических и горно-лыжных кластеров — сложная и комплексная задача. Эти работы нуждаются в предпроектном проведении исследований как на территории равнинных ландшафтных комплексов, так и в горной местности, включая территории с предельно сложным рельефом (скальные сбросы, отвесные стены, речные каньоны и пр.). Обычно один только этап технико-экономического обоснования планируемых проектных решений и общая оценка бизнес-модели занимает несколько лет; столько же или больше времени может понадобиться и на проведение изыскательских работ и проектной деятельности. В эти процессы могут быть вовлечены десятки и сотни специалистов, а сами подобные проекты могут обретать федеральное или даже международное значение. Примером подобных объектов-проектов явилось строительство начальной стадии горно-туристического кластера в Красной Поляне в рамках подготовки к Зимним Олимпийским Играм в Сочи в 2014 г.

Большая часть специалистов, привлекаемых к выработке проектных и экономических решений, не является ГИС-специалистами и не имеет опыта работы с пространственными данными. Полный объем результатов изысканий доступен не каждому из них, руководители проектов часто имеют довольно смутное представление о расположении и особенностях территории.

Кроме вышеупомянутого, различные филиалы и дочерние отделения компаний, реализующих проект, работают с совершенно разнотипными данными, многие из них никак не учитывают пространственные аспекты деятельности. В том случае, когда такие материалы используются, их подробность может колебаться от 1:1 000 000 (стадия обоснования инвестиций, используется высшим руководством компании и менеджерами старшего звена) до 1:200 (реконструкция зданий, причалов, промышленных сооружений, проектировщики и строители). Все эти сведения имеют разный пространственный охват и собираются различными методами. При попытке их сведения в единое информационное поле данных возникают сложности: от различий в проекциях до различий в форматах данных.

Не последнюю роль играют и ограничения в части обеспечения безопасности использования данных, характерные для компаний, ведущих работы по крупным проектам. Большая часть материалов, собранных в ходе подготовки к реализации проекта, представляет собой коммерческую ценность; нередко она составляет и государственную тайну. Подобные сведения не должны свободно распространяться по открытым каналам связи или передаваться в сторонние компании в виде непосредственно готовых для работы данных, но при этом они должны давать возможность решать текущие задачи — от общей ситуационной осведомленности до конкретных проектных решений.

Одним из возможных подходов для решения вышеописанного набора проблем может быть создание виртуальных моделей с использованием ГИС-пакетов, доступных на коммерческом рынке, наиболее распространенные из которых — ArcGIS (ArcScene, ArcGlobe). Однако, помимо высокой цены и сложностей в освоении, данные продукты не обеспечивают хорошего качества визуализации (рендеринга), предъявляют необоснованно высокие требования к аппаратному обеспечению. Отдельные (ранее доступные на российском рынке программного обеспечения) ГИС-пакеты и модули, созданные специально для виртуального моделирования (ERDAS Virtual GIS, Space Eye и пр.) обладают схожим набором недостатков. Ввиду введенных в 2022–2023 гг. санкций и ограничений на поставки западного программного обеспечения, официальное использование западного профессионального программного обеспечения становится также затруднительным для новых пользователей.

Решением этих проблем может быть создание комплексных виртуальных моделей (сред) с полностью закрытой от редактирования или экспорта части данных географической основой с использованием 3D-ядра западного производства и доработанной российскими специалистами визуальной оболочки и функций пространственного анализа. В данной работе описывается пример реализации проекта на базе описанного подхода к созданию виртуальных географических сред на базе 3D-ядра Unity. Основным методом информационного наполнения подобной виртуальной модели предлагается воздушное лазерное сканирование, цветная цифровая съемка в видимом диапазоне, а также открытые источники данных и результаты пространственной обработки этих материалов, отображаемые в модели.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Источники данных для создания виртуальных моделей (ВМ) горно-туристических комплексов**

Существующие фондовые и открытые источники данных для информационного обеспечения задач проектирования в условиях сложного рельефа совершенно недостаточны. Из имеющихся в фактическом доступе следует в первую очередь упомянуть военно-топографические карты м-ба 1: 50000–1: 25 000 с сечением рельефа 5–20 м и оценочной точностью рельефа на уровне  $1/3$ – $1/2$  от величины сечения горизонталей (1,7–5,0 м для 1: 25 000, 3,5–10 м для 1: 50 000), материалы дистанционного зондирования из космоса с пространственным разрешением на уровне 0,5–1,5 м, распространяемые на коммерческой основе; бесплатные данные космической съемки с пространственным разрешением 10–30 м (космические аппараты Sentinel, Landsat и схожие с ними по техническим характеристикам); достаточно редко — топографическая продукция м-ба 1: 10 000 или детальнее (обычно сильно устаревшая). Также имеются широко известные открытые источники информации о рельефе — такие, как бесплатные ЦМР AW3D30 (Alos DEM 30) или SRTM и платные данные. Все эти источники данных о рельефе не обеспечивают точность и детальность лучше 1: 50 000 [Mukul, 2017].

Отметим, что для выполнения проектных решений (и соответствующих экономических расчетов) требуется использование данных с масштаба 1: 10 000 для общих решений территориального планирования, 1: 2 000 — для проектирования на незастроенных территориях и 1: 500–1: 200 — для проектирования на застроенных территориях. При разработке проектов освоения территории должны быть представлены данные в составе топографических планов, ортофотопланов, цифровые модели рельефа и производные от них модели (карты углов наклона, кривизны склонов, экспозиции). Данные должны быть не старше 2 лет. Согласно СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания в строительстве», пространственная точность большинства сведений о ситуации должна быть на уровне 0,4–0,5 мм в масштабе карты (например, для 1: 2 000 это 0,8 м) в части планового положения и  $1/3$  сечения рельефа (для 1: 2 000 сечение рельефа составляет 1 м, а точность — 0,33 м). Эти требования крайне высоки для имеющихся фондовых материалов.

Данные космической съемки в видимом диапазоне, плановой аэрофотосъемки с пилотируемых носителей и с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) не дают детальных сведений о рельефе и микрорельефе местности под пологом растительности, в условиях затененных склонов, вертикальных скальных стен и прочих условиях горного рельефа. Данные космической радиолокационной съемки о горном рельефе обычно недостаточно детальны (при использовании более длинных волн), либо не достигают фактической поверхности о рельефа, отражаясь от крон деревьев (при использовании более коротких длин волн).

В отличие от городского или сельского строительства, где площади объектов редко превышают 50–100 га, работы по проектированию горно-туристических комплексов могут охватывать территории площадью в десятки и даже сотни км<sup>2</sup>. Например, площадь территории горнолыжного кластера в Сочи – Красной Поляне превышает 200 км<sup>2</sup>. Это не позволяет хоть сколько-нибудь полно решить проблему обеспечения детальными данными столь крупных объектов с использованием наземных методов съемки и требует применения инновационных съемочных методов, обеспечивающих одновременно и высокую точность, и производительность.

В данный момент таким методом информационного обеспечения проектов является лазерное (лидарное) сканирование с пилотируемого или беспилотного носителя с одновременной цветной аэрофотосъемкой (RGB) в видимом диапазоне (реже в ближнем инфракрасном и в тепловом диапазонах). Данный метод обеспечивает полноту и точность, соответствующие м-бам 1: 200–1: 5 000 на значительных по площади территориях [Chen, 2007]. Стоимость 1 км<sup>2</sup> подобной съемки (выполняемой одновременно) уже сопоставима с ценой проведения космической стереосъемки с последующим моделированием видимой поверхности в стерео-режиме. Надежность метода очень высока и гарантирует низкий процент случаев превышения предельных погрешностей при выполнении работ. Так, одной из наиболее ценных и безальтернативных особенностей лидаров является способность лазерных импульсов (с полной оцифровкой формы принимаемого сигнала) проникать сквозь листву и ветви растений, достигая поверхности грунта и позволяя регистрировать множественные отражения, порожденные одним исходным импульсом. Эта особенность позволяет отображать рельеф в залесенной местности с практически той же подробностью, что и на открытом пространстве, а также выполнять (при необходимости) дешифрирование нижних ярусов растительности, поваленного леса и прочих объектов ниже главного яруса растительности [Korpela, 2008].

### **Данные, производные от материалов аэрофотосъемки и лазерного сканирования**

Главную роль при создании крупных высокоточных виртуальных моделей (когда сочетаются высокая точность с высокой реалистичностью и большим пространственным охватом) играет применение лазерного сканирования совместно с аэрофотосъемкой [Schwalbe, 2005]. В данный момент только это метод обеспечивает одновременное получение пространственных данных нужной детальности.

Прямыми результатами лазерного сканирования и аэрофотосъемки являются облака точек отражений и аэрофотоснимки с элементами внешнего ориентирования, а также данные с других сенсоров, установленных на борту в ходе залета. Это могут быть наклонные камеры видимого диапазона, кадровые камеры или сканеры, работающие в тепловом и ближнем инфракрасном диапазонах и т. д.

Сами по себе точки лазерных отражений являются топологически несвязанными данными (в отличие от векторных топологических слоев ГИС или регулярно-ячеистых моделей данных), и работа с ними малопроизводительна и неудобна. Обычно пользователь всегда имеет дело с какими-либо результатами обработки данных исходного залета [Haala, 1998]. Возможно отметить несколько уровней последовательной обработки данных:

- Уровень 0. Облако точек лазерных отражений, разделенное на классы, а также уравниваемый фотограмметрический блок снимков;
- Уровень 1. Регулярно-ячеистые матрицы высот, созданные по классу точек «земля», ортофотопланы с исправлением искажений за наклон и рельеф;
- Уровень 2. Триангуляционные модели рельефа (структурные и бесструктурные), матрицы относительных высот растительности, матрица углов наклона, матрица экспозиции склонов;

- Уровень 3. Векторные слои общегеографической и тематической нагрузки [Zhang, 2001].

Для практического применения необходима вся совокупность данных со всех уровней обработки.

### **Предпосылки для использования виртуальных сред в качестве замены ГИС-пакетов при планировании, строительстве и эксплуатации горно-туристических кластеров**

Как уже было отмечено, геоинформационные системы обладают рядом недостатков:

- необходимость обучения работе с ними людей без специального образования;
- возможна либо работа с полнофункциональными программными продуктами (значительная цена, ограниченное количество рабочих мест), либо использование бесплатных модулей с неполной функциональностью в части геоанализа, невозможность решения проблем с реалистичной трехмерной визуализацией (низкое качество рендеринга);
- требование защиты от копирования пространственной информации, представляющую коммерческую ценность, при этом для достижения приемлемого качества разрабатываемых проектных решений число ее потенциальных пользователей необходимо увеличивать;
- при работе на объектах, где нет скоростных каналов доступа к сети Интернет, пространственная информация о районе работ обязательно должна присутствовать на полевом рабочем устройстве (ноутбук, планшет, редко — настольный компьютер) пользователя вместе с программным обеспечением.

Приведем пример регулярно возникающих, но при этом простейших задач. К ним можно отнести:

- визуальная оценка оптимальных маршрутов перемещения с точки зрения рельефа, проходимости растительности и уклонов;
- оценка относительных высот и превышений участков местности;
- оценка длины линейных объектов или их периметра площадных;
- обходы водных объектов или техногенных и природных препятствий (ветровалы, сбросы, обрывы);
- оцифровка и изменение простых векторных объектов на территории планируемых работ;
- оценка уклонов (с целью определения уровня сложности горнолыжных трасс, объемов перемещаемого грунта, проходимость строительной и обслуживающей техники, возможность или невозможность расположения в выбранной точке опор подъемников).

Все эти задачи без проблем могут быть реализованы без использования специализированных ГИС-пакетов. Вместо них возможно использовать закрытые от редактирования и доступа к исходным данным виртуальные среды.

### **Концептуальные и технические требования к виртуальным средам для нужд проектирования горно-туристических кластеров**

Учитывая упомянутые выше требования к составу и покрытию данными, а также и имеющиеся недостатки, возникающие при использовании обычных геоинформационных систем, можно сформулировать нижеследующие требования к созданию виртуальных географических сред будущих горно-туристических кластеров [Allen, 2003]:

- Виртуальная среда требует наличия простого и интуитивно понятного интерфейса и набора функций, пригодных к использованию персоналом без навыков работы с ГИС.
- Виртуальная среда должна обеспечивать высокую степень реализма ландшафта и эффект присутствия на местности.
- Необходимо обеспечить возможность трехмерной визуализации в реальном времени на персональном компьютере с разрешением экрана не ниже 1920x1080 и выше в не самой мощной конфигурации.
- Геопространственные данные в составе виртуальной среды должны быть закрыты от несанкционированного копирования или экстракции.
- Ни одно из существующих ГИС-приложений (платных или бесплатных) не должно использоваться в качестве среды.
- Виртуальная модель должна быть создана в виде некоей отдельной программы, обеспечивающей возможность работы на сколь угодно большое количество рабочих станций пользователей (без обеспечения режима работы по сети).
- Виртуальная среда должна обеспечить полноту и точность данных на нескольких масштабных уровнях:
  - уровень 1: район строительства подъемников, отельных комплексов, торгово-развлекательных объектов — 1: 500, сечение рельефа 0,5 м; источник данных — воздушное лазерное сканирование, цифровая аэрофотосъемка, наклонная аэрофотосъемка;
  - уровень 2: районы горнолыжных трасс, дорожек для треккинга и их буферная зона шириной до 5000 м — 1: 2 000, сечение рельефа 1,0 м — воздушное лазерное сканирование, цифровая аэрофотосъемка;
  - уровень 3: окружающие районы, включая скальные участки, ближайшие населенные пункты, заповедные территории — на площади территории радиусом до 80 км; детальность — 1: 50 000 в части рельефа (источник данных — ALOS DEM) или 1: 100 000 (SRTM), 1: 10 000–1: 25 000 — в части ортофотопланов (данные космической съемки с детальностью 3–10 м, различные сканирующие системы, материалы — из бесплатных источников).
- Необходимо обеспечить возможность выполнения измерений плановых координат и высотных отметок — в принятой системе координат и высот.
- Модель должна обеспечивать возможность импорта/экспорта пользовательских данных векторного типа на базе формата \*.KML (формат данных для Google Earth); кроме того, необходимо реализовать возможность редактирования линейных, полигональных, точечных векторных объектов в указанных слоях данных.

### **Типы виртуальных моделей местности и их недостатки**

Виртуальная модель местности (далее — ВММ) — это математическая модель территории, включающая в себя сведения о высотах земной поверхности, ее спектральных характеристиках и объектах, локализованных в ее пределах, предназначенная для интерактивной пользовательской визуализации, обладающая эффектом присутствия наблюдателя на местности. Для создания и визуализации ВММ с достаточно высокой степенью реалистичности требуется применение программ, способных обрабатывать трехмерные объекты, «драпированные» («обтянутые») текстурой (растровыми картами либо снимками), рассчитывая в реальном времени не менее 20 кадров в секунду.

Виртуальные модели местности, созданные на базе геоданных, применяются свыше 30 лет. Многие коммерческие ГИС (ArcGIS или ERDAS) предлагают уже готовые к работе

модули с заранее подготовленными массивами ГИС-сведений для последующего применения в состав формируемой ВММ. Виртуальные модели такого типа отличаются низкой степенью реализма (используются условные текстуры, библиотеки и наборы объектов имеют небольшое разнообразие, в значительной мере эти изобразительные меры условны). Несмотря на развитость функций по обработке существующих и созданию новых геоданных, эти модели требуют установки на компьютере пользователя основного ГИС-приложения (например, ArcGlobe требует наличия ArcMap), что снижает число потенциальных пользователей этого вида моделей (стоимость лицензии на одно рабочее место у подобного программного обеспечения может превышать 15 000 евро).

Следует также отметить специальные программные среды для создания ВММ из готовых ГИС-данных, которые не предусматривают возможность коррекции исходных материалов — например, SpaceEye или ERDAS Virtual GIS. При значительно меньшей стоимости рабочего места пакета-конструктора ВММ и при наличии бесплатного приложения для визуализации готовой ВММ, подобные программные решения обладают теми же недостатками вышеперечисленных ГИС-пакетов в части реализма. При этом они не обладают функциональностью в части редактирования самих ГИС-данных (а где-то это все равно нужно делать). В конечном итоге это все равно вынуждает пользователей приобретать и полнофункциональные ГИС — для того, чтобы иметь возможность хоть что-то изменить в данных. Тем самым уровень затрат потенциального пользователя возрастает.

Распространение цифровых аэросъемок с БПЛА или пилотируемых носителей создало класс пользователей ВММ, использующих фактически и фотореалистичные текстуры и визуальные 3D поверхности объектов. Разделения на отдельные объекты при этом может и не происходить — реальность моделируется как сплошная видимая поверхность, представленная в виде сотен миллионов треугольников. Этот тип ВММ распространен и обладает сильными и слабыми сторонами. Примером такого решения (в виде отдельного приложения, не использующего Интернет) является Sputnik от компании AgiSoft, визуализирующий данные, полученные ранее путем обработки исходной аэрофотосъемки в фотограмметрическом комплексе Metashape (от того же производителя). На рынке также распространены и онлайн-ресурсы, реализующие работу с виртуальными средами в режиме доступа через Интернет, например Google Earth.

ВММ, ориентированных на использование данных лидарных съемок и сопутствующих им данных, немного (например Bentley Point Tools). Ввиду все более широкого распространения материалов лидарной съемки, все чаще возникает необходимость в создании на их базе ВММ высокой степени реализма.

### **Выбор программной основы для разработки ВММ и ее функций**

В качестве программного «ядра» для создания виртуальных сред, учитывающих недостатки, отмеченные нами выше, была выбрана платформа для визуализации трехмерных сред на базе UNITY. Unity — это кросс-платформенная среда разработки интерактивных виртуальных сред, созданная фирмой Unity Technologies (США). Unity позволяет создавать отдельные модули, функционирующие на десятках аппаратных платформ, включая как персональные компьютеры, так и игровые консоли, мобильные устройства, интернет-приложения и ряд других. Первая версия Unity вышла в 2005 г., и в течение последних 18 лет среда постоянно развивалась. На основе решений Unity создано значительное число виртуальных сред, приложений, визуализаций математических и пространственных моделей, которые охватывают большой круг задач. При этом Unity может быть использована коллективами любой численности — от мелких фирм до крупных корпораций.

Преимущества Unity состоят в следующем:

- визуальная среда разработки;

- возможность межплатформенной поддержки;
- модульная система компонентов;
- дешевизна.

С точки зрения описанной концепции нужно отметить, что непосредственная загрузка пространственных данных в среду неквалифицированным пользователем затруднена и сопряжена с необходимостью делать дополнительные процедуры по их подготовке (сегментация, генерализация и пр.). В ряде случаев прямое встраивание геоданных (например, векторные полигональные 2D-данные) в среду невозможна, и необходимо выполнять конвертацию 2D данных из векторной в растровую форму или создавать псевдо-3D объекты (которые, по сути, трехмерны, но из-за вырожденности третьей координаты визуализируются как двумерные).

### **Выбор участка и получение данных**

В качестве тестового участка для отработки вышеописанной концепции была выбрана территория существующих и проектируемых горно-туристических комплексов в районе Сочи – Красная Поляна – плато Лагонаки. Все объекты расположены на территории Краснодарского края и Республики Адыгеи (рис. 1).

Район включает в себя приморские, предгорные и горные ландшафты Кавказа. Для наполнения данными модели были использованы материалы залетов 2008 г. (территория Сочи), 2014 г., 2018 г. — для территории Красной Поляны, 2022 г. — для территории Лагонаки.

Съемки 2018 г. проводились дважды, в весенний и летний периоды, что позволило создать модель толщины и распределения снежного покрова в период его максимальной толщины. Более подробно методика этой работы была описана в предыдущих статьях [Тикун, 2020]. В данную модель вносились итоговые результаты в виде растрового слоя данных.

В настоящее время на территории создания модели наблюдается очень высокая активность в части развития горно-туристических кластеров и сопутствующей прилегающей селитебной инфраструктуры с целью увеличения потока отдыхающих во все сезоны года.

Климат региона — субтропический морской на юге, умеренный континентальный (степной) на севере. Территория гористая, с выраженными альпийскими формами в пределах всего Главного Кавказского хребта. Ближе к северу преобладают предгорные ландшафты Северного Кавказа.

Поскольку вся данная территория предполагает слияние в единый горно-туристический кластер в течение ближайших 10–15 лет, а также планируется создание крупных инфраструктурных объектов (автодорог и тоннелей) на значительном протяжении, было принято решение создать модель со значительным территориальным охватом (120 x 120 км) площадью около 14 000 км<sup>2</sup>. Подобный охват позволяет в дальнейшем производить оценку ситуации и поддержку принятия решений при развитии объектов без отрыва от общей окружающей ситуации, обеспечив целостное восприятие географической среды и ее компонентов.

На территориях Большого Сочи (1 050 км<sup>2</sup>), Красная Поляна (долина р. Мзымты и прилегающие склоны хребтов (320 км<sup>2</sup>) и плато Лагонаки (27 км<sup>2</sup>) в разные годы было выполнено несколько проектов с использованием систем воздушного лазерного сканирования (рис. 2). Лазерное сканирование выполнялось с использованием лазерных сканеров RIEGL Q560 и Leica ALS50, использовалась цифровая фотокамера IGI DigiCam 60 (среднеформатная авиационная камера с разрешением матрицы в 60 МП) или аналогичные. Из открытых источников данных были получены фото наземных объектов. Перспективные и наземные снимки использовались для дешифрирования топографических планов и текстурирования 3D объектов. Съемка велась с борта самолета Ан-2. Полеты выполнялись в 2008 г. (Большой Сочи), 2014 г. и 2018 г. (Красная Поляна), 2022 г. (Лагонаки).

Залет производился по системе параллельных треков, продольное перекрытие фотоснимков составило 60 %, поперечное — от 30 до 55 % (аналогично и для лазерного сканирования).

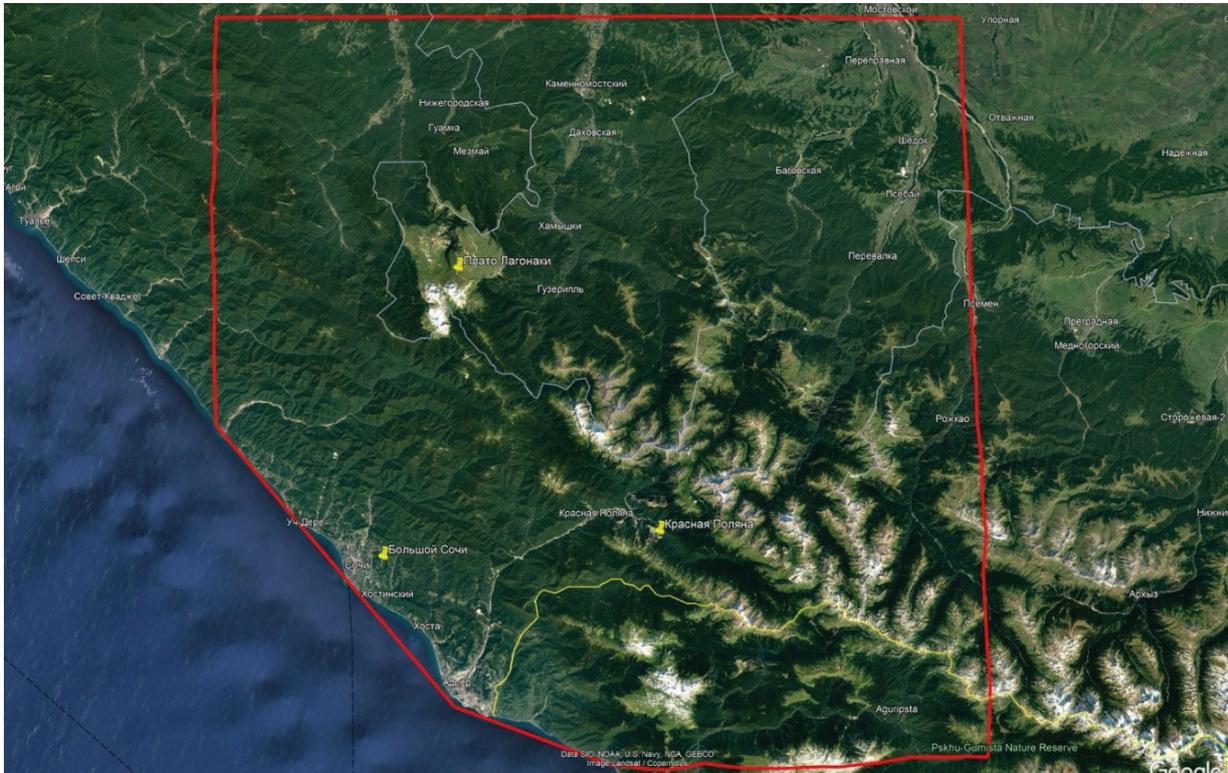


Рис. 1. Районы создания виртуальной модели. Красный контур — уровень детальности 3  
Fig. 1. Extent of virtual modelling levels. Red contour — level of detail 3

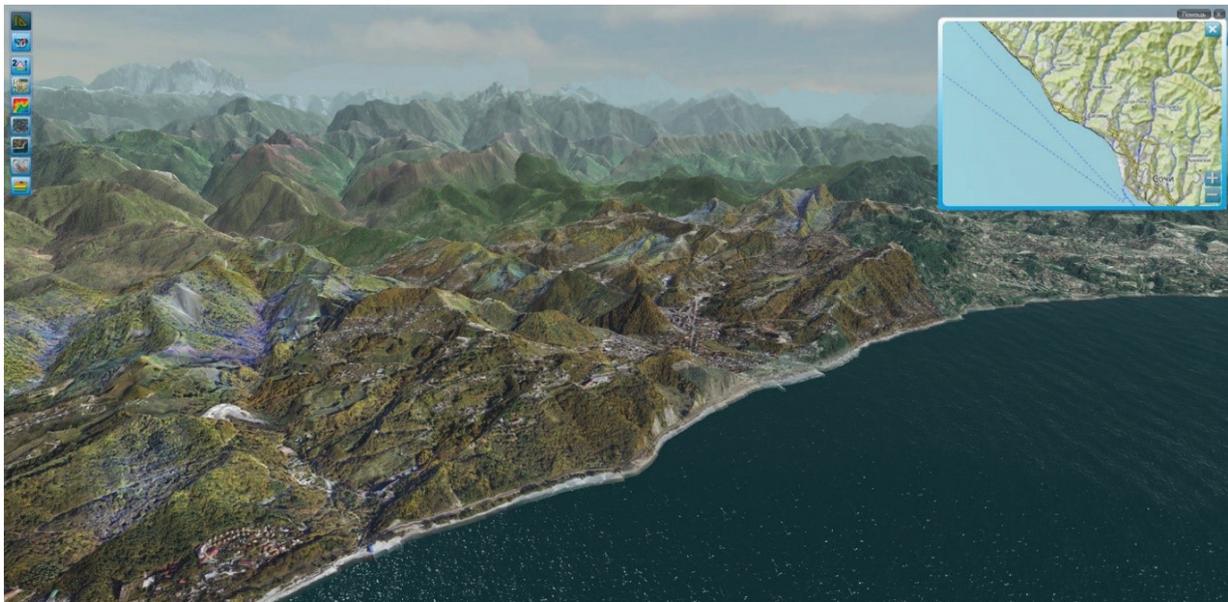


Рис. 2. Район Большого Сочи. Моделирование с детальностью уровня 3 и 2.  
Использованы открытые источники данных и материалы лазерного сканирования. Вертикальный масштаб 2: 1  
Fig. 2. Big Sochi area. Modeling with level 3 and 2 detail. Open data sources and laser scanning materials were used. Vertical Scale 2: 1

Аэрофотосъемка и лидарное сканирование производились одновременно. Работа велась с высот 350–800 м над поверхностью рельефа. Разрешение фотоснимков составило от 5 до 10 см, плотность лазерного сканирования — от 5 до 16 точек на 1 м<sup>2</sup>. Это соответствует требованиям м-бов 1: 500 и 1: 2 000 с запасом по детальности и плотности сканирования.

Для увеличения уровня реализма в ВММ были использованы нижеперечисленные решения:

- звуковое сопровождение волн, их анимация и визуальные эффекты динамического освещения;
- светотеневое моделирование подводных эффектов при «погружении» камеры под воду;
- моделирование неба и облаков;
- моделирование дымки;
- моделирование отдельных деревьев.

Для упрощения ориентирования в пространстве модели была использована интерактивная карта-врезка (при необходимости может быть свернута), дающая возможность масштабирования и смены охвата территории, а также быстрого перемещения камеры в указанную на карте-врезке точку.

Для непрерывного демонстрационного показа без участия пользователя модель была снабжена заранее созданной траекторией для облета камеры. При этом в любое время возможно переключение управления обратно на пользователя и управляемая навигация в модели.

По итогам обработки данных различных по времени залетов (2008, 2014, 2018, 2022 гг.) были получены облака точек лазерного сканирования. Точки лазерных отражений были разделены на классы «Земля», «Сооружения», «Растительность», «Прочее». По координатам точек класса «Земля» были созданы триангуляционные и матричные модели рельефа; впоследствии они применялись также и для создания топографических планов 1: 2 000 и 1: 500 [Gorgens, 2017], равно как и модели рельефа в среде UNITY.

Моделирование искусственных сооружений выполнялось с использованием материалов лазерного сканирования (определение габаритов и форм). Для этого точки лазерных отражений из класса «Растительность» преобразовывались в ячеистую модель данных (GRID) с шагом около 50 см, загружались в ГИС-пакет ArcView и оцифровывались по контурам сооружений. По данным этой же модели определялась высота объекта или высоты его характерных точек. Итоговые трехмерные векторные материалы через промежуточный формат DWG экспортировались в среду моделирования 3D MAX, где полученный контур редактировался с учетом атрибутивных характеристик для «выдавливания» на ранее определенную высоту, «Tessellate» (разделение ребер или граней на более короткие сегменты последующей их визуально-ручной модификации с целью приведения к соответствию реальной форме сооружений). При создании комплексных 3D-объектов использовалось моделирование по частям с последующим «слиянием» 3D-объектов.

При построении моделей рельефа уровней 1 (высокодетальный) и 2 (детальный) также использовались точки лазерного сканирования класса «Земля». Точки данного класса использовались как основа для создания TIN-поверхности по методу триангуляции Делоне и импортировались в среду Unity напрямую. Видимые поверхности для уровня 3 (обзорный) создавались аналогичным методом с последующим прореживанием граней с целью устранения малозначительных для формы рельефа элементов (с целью экономии вычислительных ресурсов итоговой модели при визуализации в реальном

времени. Далее в зонах стыковки сегментов моделей разной детальности выполнялась сводка узлов и вершин TIN-поверхностей (вручную или автоматически) с последующим их слиянием в единые сегменты данных, готовых для динамической подгрузки и визуализации в реальном времени.

Для текстурирования вертикальных поверхностей применялось наложение текстур стен, полученных либо по данным наклонных съемок с воздуха, либо по данным наземной фотосъемки. Для драпировки рельефа реалистичными текстурами применялись ортофотопланы или иные геопривязанные растровые изображения (см. ниже). После наложения текстур готовые 3D-объекты вместе с текстурами подгружались в среду UNITY через обменный формат OBJ.

Набор слоев геоданных включал в себя:

- цифровую модель рельефа в виде сетки с шагом 1 м и высотной точностью около 15–20 см для уровней 1 и 2 и точностью исходных моделей рельефа SRTM или AW3D30;
- растровые изображения в виде цветного ортофотоплана 1:2 000 с детальностью 10 см;
- растровые изображения в виде топопланов с полупрозрачной текстурой ортофотоплана;
- растровые изображения в виде раскрашенной по высотам модели рельефа с нанесенными горизонталями и отметками высот;
- растровые изображения в виде карты глубины снега;
- растровые изображения в виде карты углов наклона;
- растровые изображения в виде карты экспозиции склонов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

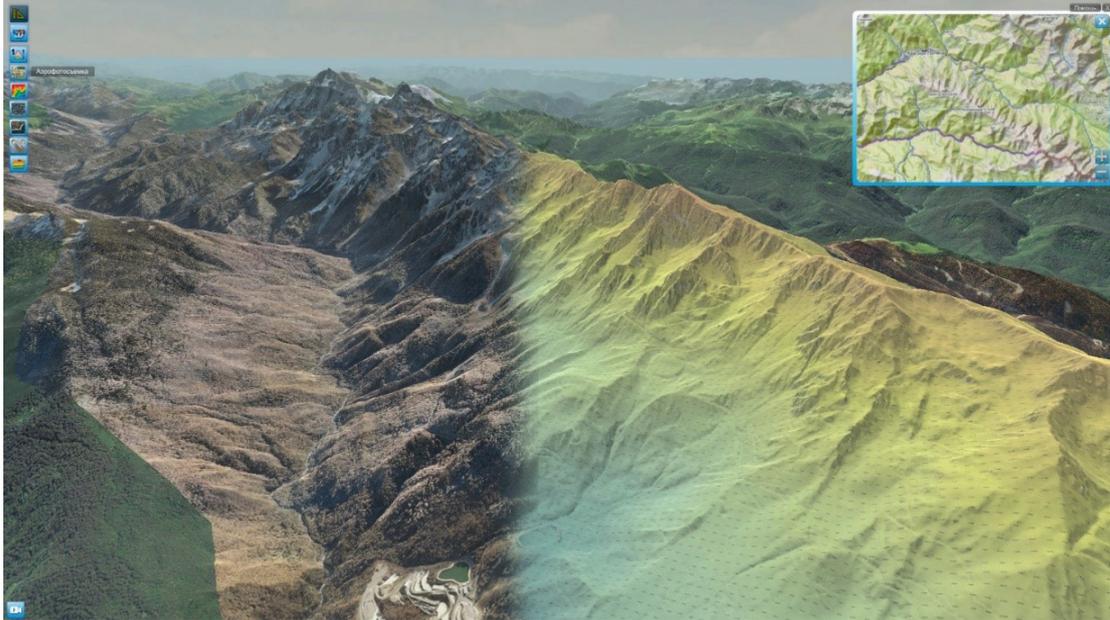
После унификации и подготовки собранные слои пространственных данных и функций по управлению визуализацией, координатным запросам и т. д. подвергаются окончательной сборке и итоговой компиляции, после чего исходные геоданные превращаются в закрытые бинарные файлы, визуализируемые с помощью самостоятельно работающего EXE-приложения. Оболочка для работы с данными ориентирована на работу в среде Windows 7 и новее, поддержка работы на иных платформах (например, Apple или Android) в данный момент не реализована и не планируется. Подобный программно-информационный комплекс не требует инсталляции, при запуске позволяя выбрать качество визуализации 3D-сцен, разрешение экрана (или окна — при работе в оконном режиме) и выполняет 3D-визуализации и пространственные запросы в режиме реального времени. Итоговая виртуальная среда обладает следующими достоинствами:

- защищенность от дублирования и информации (несанкционированное использование информации напрямую невозможно, декомпиляция затруднена);
- простота интерфейса и необходимый минимум функций;
- небольшие размеры (до 12 Гб дискового пространства);
- нетребовательность к ресурсам компьютера (16 Гб оперативной памяти и процессор Intel Core i7 — вполне достаточно);
- очень хорошее качество (по отзывам пользователей) визуализации и стабильность работы.

### Общее описание модели

Основной вертикальный масштаб виртуальной модели (а также на всех иллюстрациях модели в данной работе) — 1:1. В виртуальной среде реализована возможность преувеличения вертикального масштаба до 2:1.

Визуальную основу модели составляет TIN-модель рельефа, текстурированная одной из трех текстур (RGB ортофото, карта высот в виде цветной шкалы с нанесенными горизонталями и точечными отметками высот [Lohr, 1997], топоплан 1: 2 000–1: 500).



*Рис. 3. Виды слоев-текстур: слева — ортофотоплан, справа — карта высот с нанесенными отметками высот*  
*Fig. 3. Types of texture layers: on the left — orthomosaic, on the right — elevation map with plotted contour lines*

Матрица высот также была применена для производства растрового изображения с цветовой шкалой высот с последующим нанесением на нее горизонталей и точечных отметок высот (рис. 3). По полученным ортофотопланам и цифровым моделям рельефа были построены цифровые топопланы 1: 500 и 1: 2 000.

При создании модели поверхности для UNITY также применялись сведения о батиметрии морских участков, взятые с топографических карт 1: 200 000. Все модели рельефа были сведены между собой по высоте с использованием стандартного инструментария ArcView 3.2 и специально написанных для этой задачи подпрограмм на языке Avenue (также в среде ArcView 3.2), что дало возможность создать единую бесшовную и бесступенчатую (на стыках) поверхность рельефа в созданной виртуальной среде.

Полученные слои данных (модель рельефа с текстурами видимых фотоснимков, гипсометрической картой, топографическими планами 1: 1 000, карта толщины снежного покрова (рис. 4), карты углов наклона и экспозиции склонов) были встроены в оболочку виртуальной среды в виде переключаемых наборов данных.

Основное средство управления моделью и навигации в ней — мышь и клавиши перемещения курсора. Все прочие запросы переключаются с использованием кнопок экрана.

Модель обеспечивает возможность измерений высот, длин, периметров, превышений, площадей (рис. 5). Возможно обращение к атрибутике векторных объектов, подгружаемых пользователем в формате KML (формат геоданных Google Earth). KML принят как основной обменный формат для пользовательских данных в виду его простоты и широкого распространения. Формат является открытым, что облегчает задачу даль-

нейшего развития ГИС-инструментария подобных моделей. Пользователь может самостоятельно оцифровать или загрузить ранее оцифрованные точечные, линейные, полигональные ГИС-объекты в данном формате, осуществить редактирование (как данных, так и стилей их отображения), выгрузку и сохранение результатов работы во внешние файлы. Детальность полученной модели позволяет даже визуально дешифрировать опасные инженерные процессы — такие как карст, оползневые участки, обвально-осыпные процессы (рис. 6).

Также в данной виртуальной среде реализована возможность работы в режиме 3D-анаглифов — визуализация в режиме стерео с использованием цветных очков (рис. 7). Управление перемещением камеры (пользователя) возможно также с применением touch-экранов, либо в автоматическом режиме по заранее заданной траектории.

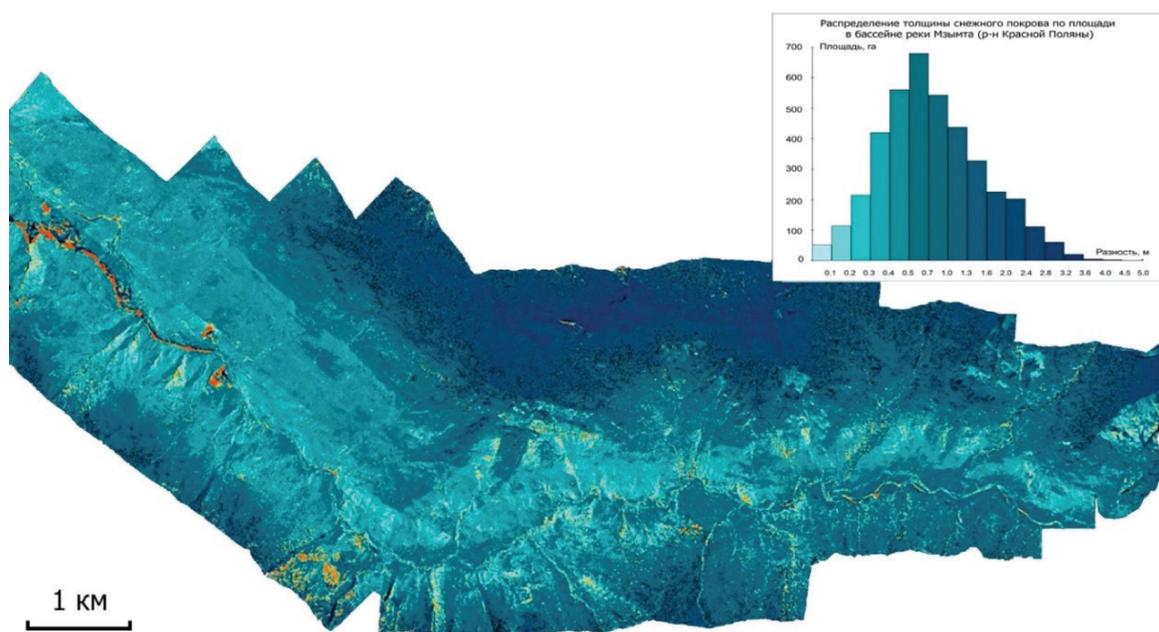


Рис. 4. Распределение толщины снежного покрова  
Fig. 4. Distribution of snow coverage

### Преимущества описанного подхода

Основными достоинствами подобного подхода к созданию виртуальных сред и информационному обеспечению работ по проектированию горно-туристических комплексов являются:

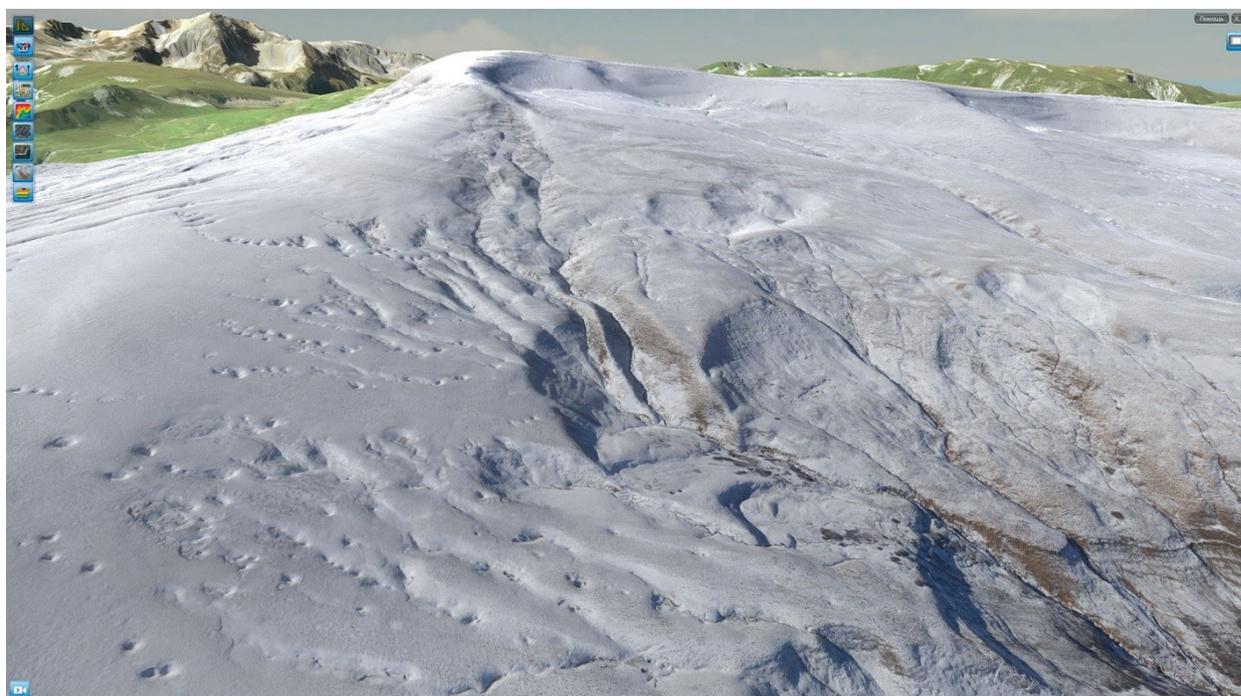
- 1) Возможность работы с высокоточными геоданными без использования Интернет;
- 2) Возможность использования виртуальной модели на любом количестве рабочих мест без лишних затрат;
- 3) Невысокие требования к аппаратным ресурсам при высоком качестве визуализации;
- 4) Защита от несанкционированного копирования пространственных данных;
- 5) Простота освоения и работы.

Подход к созданию таких ВММ имеет и ряд недостатков. Например, при потребности изменить основные наборы геоданных (добавить или убрать растровые слои, трехмерные объекты, изменить пространственный охват модели) необходимо полное перестроение всего приложения и самого набора данных. Сам процесс перестроения непрост и не может быть выполнен обычным пользователем ГИС (требуется умение

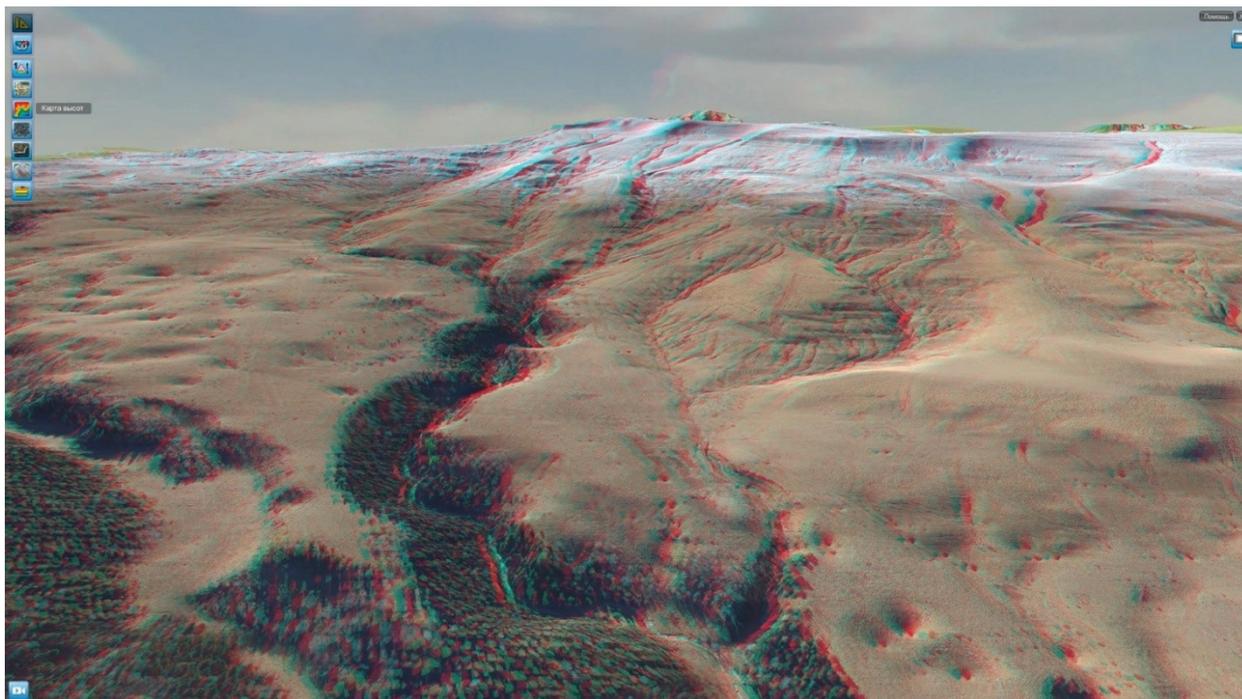
программировать на встроенном языке UNITY, иметь инструментарий для сегментации пространственных данных и их сводки).



*Рис. 5. Измерение длин и площадей в модели*  
*Fig. 5. Measuring length and area of the polygon in the model*



*Рис. 6. Опасные инженерные явления (карст, хорошо видны карстовые воронки)*  
*Fig. 6. Hazardous engineering phenomena (karst, sinkholes are clearly visible)*



*Рис. 7. Анаглифическая стереовизуализация*  
*Fig. 7. Anaglyphic stereovisualization*

Требования модели в части аппаратного обеспечения — не менее 16 Гб оперативной памяти, процессор уровня Intel Core i7 или аналогичный (и выше), видеокарта с производительностью на уровне NVIDIA 1650й серии или лучше. Впрочем, такие требования не являются чем-то необычным для современного настольного компьютера или ноутбука.

Дальнейшая работа с подобными системами предполагает использование производительных, но тем не менее персональных (не специализированных) компьютеров. Одним из важных вопросов для изучения в данной работе являлась оценка возможных пределов габаритов территории, на которых данный подход к моделированию может быть реализован. Опыт создания данной модели показал возможность обеспечения приемлемого уровня комфорта работы модели на персональных компьютерах с процессорами Intel Core i7 и 16 Гб оперативной памяти при площади территории до 14 000 км<sup>2</sup>. Это говорит о возможности применения этого подхода к созданию ВММ не только на небольших участках отдельных проектов, но и на целых регионах или в пределах отдельных субъектов РФ.

## **ВЫВОДЫ**

По итогам проделанной работы можно утверждать, что описанная в работе концепция создания виртуальной модели с дифференцированными уровнями детальности (1: 100 000–1: 2 000–1: 500) с использованием материалов из открытых источников, а также материалов воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки технически реализуема на обычных персональных компьютерах с оперативной памятью от 16 Гб на базе процессора Intel Core i7 (или аналогичного) на территориях площадью до 25 000 км<sup>2</sup>. Данная модель может быть использована как ГИС-специалистами, так и обычными пользователями без какой-либо подготовки. Обучение работе с моделью составляет не более 1 часа.

Виртуальная среда обеспечивает превосходное качество трехмерной визуализации, возможность работы ГИС-слоями модели (растровыми и/или векторными в формате KML). Все объекты модели созданы в реальных габаритах и координатах с точностями, соответствующими масштабу (1: 50 000, 1: 2 000 или 1: 1 000). Модель обладает высокой эффективностью использования аппаратных ресурсов и не предъявляет высоких аппаратно-технических требований к персональному компьютеру. Пространственные данные, составляющие основу модели, не могут быть несанкционированно скопированы и распространены.

Применение подобных виртуальных сред при проектно-изыскательских работах может быть весьма эффективно на всех уровнях (это могут быть как управляющие и/или инжиниринговые компании, так и непосредственные исполнители проектных решений). Данный подход реализует возможность доступа к 3D ГИС-данным для всех участников процесса реализации проектов развития горных туристических кластеров, что повышает ситуационную осведомленность и снижает долю неоптимальных решений. Также данные среды позволяют на практике внедрить геоколлаборацию участников процесса проектирования без значительных технических затрат.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Тикунов В.С., Рыльский И.А.* Подходы к определению толщины снежного покрова с использованием лазерного сканирования. *Геодезия и картография*, 2020. № 8. С. 28–41.
- Allen P.K., Stamos I., Troccoli A.A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y.* 3D modeling of historic sites using range and image data. *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003. V. 1. P. 145–150.
- Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.
- Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L.* A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2017. V. 1. P. 343–350.
- Haala N., Brenner C., Anders K.-H.* 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998. P. 339–346.
- Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 2008. P. 3891–3897.
- Lohr U.* Digital elevation models by laserscanning: Principle and applications. *Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, 1997. P. 174–180.
- Mukul M., Srivastava V., Jade S.* Uncertainties in the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, 2017. P. 1–10.
- Schwalbe E., Maas H., Seidel F.* 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2005. P. 12–14.
- Zhang C., Chen T.* Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation. *Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing*, 2001. P. 935–938.

### REFERENCES

- Allen P.K., Stamos I., Troccoli A.A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y.* 3D modeling of historic sites using range and image data. *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003. V. 1. P. 145–150.

*Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.

*Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L.* A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2017. V. 1. P. 343–350.

*Haala N., Brenner C., Anders K.-H.* 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998. P. 339–346.

*Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 2008. P. 3891–3897.

*Lohr U.* Digital elevation models by laserscanning: Principle and applications. *Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, 1997. P. 174–180.

*Mukul M., Srivastava V., Jade S.* Uncertainties in the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, 2017. P. 1–10.

*Schwalbe E., Maas H., Seidel F.* 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2005. P. 12–14.

*Tikunov V.S., Rylskiy I.A.* Approaches to determination of snow coverage thickness using LIDAR. *Geodesy and Cartography*, 2020. No. 8. P. 28–41 (in Russian).

*Zhang C., Chen T.* Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation. *Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing*, 2001. P. 935–938.

---