

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

## СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАЙОНА АРХЫЗ

### АННОТАЦИЯ

Проектирование горно-туристических кластеров требует значительного количества усилий разных специалистов из разных организаций и регионов. Свободный обмен высокоточными данными может быть затруднен, а сами эти данные, как правило, не могут быть получены из фондов, что требует выполнения высокоточных съемок с использованием новейших технологий. В работе описывается подход к информационному обеспечению разнородных специалистов высокоточной информацией посредством выполнения съемок с использованием метода воздушного лазерного сканирования, цифровой аэрофотосъемкой. Информационное обеспечение достигается производными от этих материалов картографическими продуктами, в т. ч. виртуальной моделью с закрытыми пространственными данными. Помимо использования открытых данных на менее важные регионы, в работе отдельно рассматриваются аспекты выполнения съемок в разные сезоны и возможности, которые предоставляет такой подход (расчет слоя глубин снежного покрова, возможность дешифрировать опасные процессы, связанные со снегом). Также описан подход к наполнению виртуальных моделей не только традиционными двумерными и трехмерными картографическими материалами, но и точками лазерных отражений от наземных объектов. Подобный подход позволяет не только повысить визуальное качество изображения при визуализации трехмерной модели, обеспечив высокий уровень реализма, но и дать пользователям возможность делать точные измерения на основании исходной информации съемок. В работе рассмотрены подходы к оптимизации хранения и визуализации данных, позволяющие работать с большим объемом пространственной информации без использования специализированных компьютеров. Рассмотрены различные подходы к визуализации точек лазерных отражений в пространстве модели.

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

---

<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> Институт природных ресурсов, экологии и криологии, Сибирское отделение РАН, ул. Недорезова, д. 16а, Чита, Россия, 672014,

*e-mail:* [rogruzdev@mail.ru](mailto:rogruzdev@mail.ru)

Илья А. Рылский<sup>1</sup>, Dmitriy A. Paramonov<sup>2</sup>, Anna Yu. Kozhukhar<sup>3</sup>, Roman V. Gruzdev<sup>4</sup>

## CREATING VIRTUAL MODELS OF ARHYZ REGION

### ABSTRACT

Designing mountain tourism clusters requires a significant amount of effort from different specialists from different organizations and regions. The free exchange of high-precision data can be difficult; the data itself, as a rule, cannot be obtained from funds, which requires high-precision surveys using the latest technologies. The paper describes an approach to providing information to diverse specialists with high-precision information, through surveying using the airborne laser scanning method, digital aerial photography. Information support is achieved by cartographic products derived from these materials, including a virtual model with closed spatial data. In addition to the use of open data for less important regions, the work separately examines aspects of surveying in different seasons and the opportunities that this approach provides (calculation of the depth layer of snow cover, the ability to decipher hazardous processes associated with snow). An approach to filling virtual models not only with traditional two-dimensional and three-dimensional cartographic materials, but also with points of laser reflections from above-ground objects is also described. This approach not only improves the visual quality of the 3D model rendering, providing a high level of realism, but also allows users to make accurate measurements based on the original survey information. The paper discusses approaches to optimizing data storage and visualization, allowing you to work with a large amount of spatial information without the use of specialized computers. Various approaches to visualizing laser reflection points in model space are considered.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие горно-туристических кластеров относится к наиболее сложным видам освоения территорий в области рекреационного освоения территорий. Сочетание сложного или очень сложного рельефа, высокогорных условий, большого количества опасных инженерно-геологических процессов, крупных технических сооружений (подъемники, канатные дороги, транспортные системы — такие как тоннели, железные дороги и фуникулеры), большого количества зданий, строящихся по нестандартным проектам — все это делает развитие горно-туристических курортов очень разноплановой задачей. Решение данной задачи длится порой десятки лет, разбиваясь на много этапов и блоков, и требует усилий десятков и сотен коллективов людей. Лишь очень маленькая часть из этих людей владеет навыками работы с ГИС-приложениями, но почти все эти люди сталкиваются с необходимостью учета пространственных данных о территории и объектах на ней.

Как правило, полный объем материалов изысканий прошлых лет доступен не каждому из задействованных специалистов, руководители проектов зачастую имеют довольно смутное представление о расположении и особенностях территории. Следует отметить, что наглядность используемых в современном проектировании пространственных данных оставляет желать лучшего. Так, используемые в наши дни топографические планы, оформленные согласно ГОСТам (основной источник сведений для выработки

---

<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> Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezova str., Chita, 672002, Russia, *e-mail:* [rogruzdev@mail.ru](mailto:rogruzdev@mail.ru)

проектных решений) обладают крайне низкой наглядностью, и при большой площади территории вообще слабо поддаются осмыслению без длительного предварительного изучения. Отрицательной традицией является также составление топографических планов только на территории проектируемых объектов — в то время как прилегающие территории представляются в виде пустого белого листа, на котором как будто бы ничего нет. Но это совершенно неверно с любой точки зрения — объекты не «висят в космосе» и, конечно же, взаимодействуют с окружающими элементами природно-антропогенной среды.

Как уже было отмечено и обосновано нами ранее [Рыльский, 2023], наиболее приемлемым подходом для решения задач по информационной поддержке принятия решений при проектировании горнолыжных курортов и горно-туристических кластеров в целом является создание закрытых от редактирования виртуальных моделей на базе среды Unity. Подобные модели позволяют отобразить большой массив данных о территории. При этом нет проблем с распространением данных по различным категориям пользователей — это обеспечивается закрытостью модели от любых форм экспорта и редактирования исходных пространственных данных, на которых она была сделана.

Требования в части проектирования столь крупных пространственных объектов предполагают с одной стороны высокую точность (соответствует м-бам 1: 2 000–1: 500), а с другой — большой пространственный охват, исчисляемый тысячами и даже десятками тысяч гектаров. Кроме того, требуется наличие данных и более мелких масштабов на сопредельные территории. В зависимости от доступности, задач и радиуса буферной зоны вокруг объекта (требуемой для учета при анализе сопредельных территорий и создаваемых ими эффектов влияния) масштаб может колебаться от 1: 10 000 до 1: 100 000. Ширина внешней буферной зоны при этом может достигать десятков километров.

Геоинформационное обеспечение подобного рода проектов возможно только с использованием метода воздушного лазерного сканирования в сочетании с аэрофотосъемкой. На сегодняшний день данный метод является наиболее достоверным и точным из всех существующих методов дистанционного зондирования. Также следует отметить, что лазерное сканирование — единственный метод, позволяющий картографировать как рельеф под кронами деревьев, так и вершины растительности и ее центральные части (стволы, ветви, второй ярус растительности). Достигается это посредством регистрации нескольких отражений лазерного импульса избыточной мощности, которые формируются в результате взаимодействия начального лазерного импульса от разных частей кроны и грунта.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Методы геоинформационного обеспечения виртуальных моделей горно-туристических комплексов с использованием открытых данных**

В предыдущей работе [Рыльский, 2023] были рассмотрены возможные варианты решения задачи по информационному обеспечению процесса создания виртуальных моделей крупных территориальных комплексов, сочетающих как данные высокой и очень высокой, так и средней детальности. Это топографические карты м-бов 1: 50 000–1: 25 000, материалы космосъемок с детальностью 0.3–1.5 м (платные) и 10–15 м (бесплатные), цифровые модели рельефа открытого пользования: AW3D30 (Alos DEM 30) или SRTM (бесплатные) и более детальные ЦМР — платные. Общая черта всех этих данных — невозможность обеспечить сведения о рельефе детальнее м-ба 1: 10 000 (даже при использовании платных ЦМР) и детальнее м-ба 1: 5 000 — в части текстур [Mukul, 2017].

Однако для понимания возможных решений, дешифрирования опасных процессов и просто создания эффекта реализма нужна гораздо более детальная информация. Это данные м-бов 1: 500–1: 2 000, и получить их из открытых источников или со спутников — невозможно. Кроме того, для того, есть и другие требования:

- все перечисленные материалы должны быть не старше 2 лет;

- пространственная точность должна быть на уровне 0.4–0.5 мм в масштабе карты (например, для м-ба 1: 2 000 это 0.8 м) в части планового положения, и 1/3 сечения рельефа (для м-ба 1: 2 000 сечение рельефа составляет 1 м, а точность — 0.33 м) — согласно СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания в строительстве».

Есть и иные недостатки у данных космических съемок. Так, данные *космических съемок в видимом диапазоне, а также цифровой аэрофотосъемки* с любых видов носителей и в любые сезоны не дают детальных сведений о рельефе и его микроформах под пологом растительности, а также в пределах крутых затененных склонов, вертикальных скальных стен и сбросов и т. п. Материалы же *радиолокационной съемки* либо недостаточно детальны (при использовании более длинных волн), либо не достигают поверхности грунта, отражаясь от крон деревьев (при использовании более коротких длин волн). Также, в связи с введенными против РФ санкциями, получение зарубежных материалов радиолокационных съемок практически невозможно (отечественная радиолокационная съемка, доступная гражданским организациям, отсутствует).

В то же время площадь анализируемого региона может быть очень большой. Так, в предыдущих работах рассматривалось построение моделей площадью свыше 10 000 км<sup>2</sup> [Рыльский, 2023]. При этом площадь района, на который требуются высокдетальные данные, может составлять тысячи или десятки тысяч га. Таким образом, подобные объемы работ полностью исключают возможность использования наземных методов съемок.

Единственным реально доступным методом информационного обеспечения таких проектов является воздушное лазерное сканирование (ВЛС) с пилотируемого или беспилотного носителя с одновременной аэрофотосъемкой (RGB) в видимом диапазоне; дополнительно могут быть выполнены съемки в ближнем инфракрасном и тепловом диапазонах. Этот метод гарантирует высокие полноту и точность материалов, соответствующие м-бам 1: 200–1: 5 000 на огромных территориях [Chen, 2007]. Цена 1 км<sup>2</sup> такой съемки сопоставима с ценой проведения космической стереосъемки (включая затраты на последующее моделирование поверхности в стереорежиме). Уникальной особенностью воздушного лазерного сканирования является способность лазерных импульсов (с полной оцифровкой формы принимаемого сигнала) проникать сквозь кроны, достигая истинной поверхности рельефа. Кроме того, эта особенность позволяет регистрировать множественные отражения, вызванные единственным исходным импульсом. Данная особенность позволяет отображать рельеф в местности, покрытой лесом, с той же подробностью, что и на открытом пространстве, а также выполнять дешифрирования различных ярусов растительности, и ее геометрических характеристик [Korpela, 2008].

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

Ранее нами были детально рассмотрены несколько основных типов существующих технических средств и программного обеспечения, которые используются для создания виртуальных моделей [Рыльский, 2022]. Были также отмечены и их недостатки. Также отметим, что в данный момент не существует широко известных программных сред виртуального моделирования, которые бы позволили визуализировать в виртуальной модели не только традиционные ГИС-данные, но и точки лазерных отражений.

Учитывая вышесказанное и с учетом ранее выполненных схожих работ, для территории района Архыза было принято решение построить модель на ядре визуализации Unity. Unity — это кросс-платформенная среда разработки интерактивных виртуальных сред, созданная фирмой Unity Technologies (США). Система разработки визуальных сред позволяет создавать отдельные модули, функционирующие на различных аппаратных платформах (персональные компьютеры, игровые консоли, мобильные устройства, сайты и пр.). Первая версия Unity вышла в 2005 г., и в течение последних 19 лет среда непрерывно совершенствуется. На базе

решений Unity создано значительное число виртуальных сред, приложений, визуализаций математических и пространственных моделей, которые охватывают широкий круг задач.

Отметим, что прямая загрузка пространственных данных в среду неквалифицированным пользователем возможна только в части векторных ГИС-материалов. Данные других видов (растровые, триангуляционные и точечные наборы данных) могут быть подгружены только на этапе компиляции модели, при этом они нуждаются в подготовке (сегментация, генерализация и пр.). Прямое встраивание ГИС-данных (например, векторные полигональные 2D-данные) в среду невозможно, для этого нужно выполнить конвертацию данных из 2D-векторной в растровую форму, или создать псевдо-3D-объекты (которые, по сути, трехмерны, но из-за вырожденности третьей координаты визуализируются как двухмерные).

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

Работа по созданию виртуальной модели местности района Архыз была выполнена в рамках совместной работы с ООО «Проектстрой» и ООО «Арк-он» в интересах организации-проектировщика застройки данного горнотуристического кластера (рис. 1).

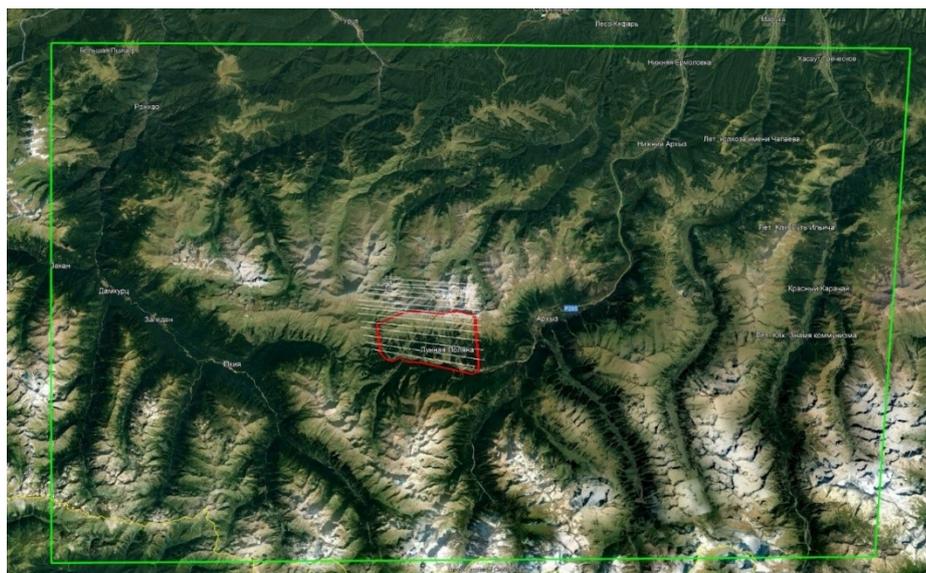
Район включает в себя предгорные и горные ландшафты Кавказа. Для наполнения модели данными были использованы материалы новых залетов лета 2023 г. и зимы-весны 2024 г. Съёмки проводились дважды (в весенний и летний периоды, что позволило создать модель толщины и распределения снежного покрова в период его максимального развития). Более подробно методика этой работы была описана в предыдущих статьях [Тикунов, 2020]. В данную модель вносились итоговые результаты в виде растрового слоя данных.

Горнолыжный кластер Архыза — один из наиболее динамичных в последние 5 лет. Развитие не только инфраструктуры для катания на горных лыжах, но и различных других видов рекреационной активности, таких как туризм, пешие однодневные прогулки, аттракционы, а также селитебной инфраструктуры и отельного бизнеса, предполагает очень разноплановые схемы использования природно-территориальных комплексов. Предполагается не только использование горнолыжных склонов, но и вершинных, долинных, залесенных и луговых склоновых ландшафтов — каждый под свои виды задач.

Климат региона — умеренно-континентальный, с умеренным воздействием морских воздушных масс. Территория гористая, с выраженными альпийскими формами в пределах всего Главного Кавказского хребта и сопредельных хребтов. Ближе к северу преобладают предгорные ландшафты Северного Кавказа.

Центральная часть района (красный контур) предполагает наивысший уровень детализации, а также и наибольшую сложность и стоимость в освоении территории. Тем не менее, этот относительно небольшой район (площадью около 4 600 га) неотделим от окружающих территорий, которые также связаны с ним — как физико-географическими, так и социально-экономическими взаимосвязями. Исходя из этого целевыми масштабами были выбраны 1:1 000 для центрального района (красный контур) и 1:100 000 — для внешней буферной зоны (зеленый контур), имеющей площадь 3 700 км<sup>2</sup>.

На территории центральной части модели (красный контур на рис. 1) было выполнено лазерное сканирование на площади около 46 км<sup>2</sup>, в ходе летнего и зимнего залетов снималась идентичная территория по идентичным полетным планам (рис. 2). Лазерное сканирование выполнялось с использованием лазерного сканера RIEGL Q680i (высота полета до 2 000 м над рельефом, скорость работы — до 400 000 измерений в секунду, регистрация неограниченного количества отражений. Для фотосъемки использована цифровая среднеформатная специализированная фотокамера видимого диапазона IGI DIGICAM H60 (разрешение матрицы 60 Мпк, размер матрицы 40.2 x 53.7 мм, использован объектив с фокусным расстоянием 50 мм).



*Рис. 1. Районы создания виртуальной модели. Красный контур — уровень  
детальности 1 и 2, зеленый контур — уровень детальности 3.*

*Fig. 1. Extent of virtual modelling levels. Red contour — levels 1 and 2, green — level 3*



*Рис. 2. Район Архыз – Лунная Поляна. Моделирование с детальностью уровня 3 и 2  
(в пределах желтого полигона). Использованы открытые источники данных  
и материалы лазерного сканирования. Вертикальный м-б 1: 1*

*Fig. 2. Arkhyz – Lunnaaya Poliana Region. Modeling with level 3 and 2 detail (yellow polygon).  
Open data sources and laser scanning materials were used. Vertical scale 1: 1*

Выполнение съемки происходило с высоты от 500 до 1 100 м над поверхностью. Съемка велась с параллельных треков, причем в силу чрезвычайно расчлененного рельефа продольное перекрытие снимков колебалось от 55 до 80 %, поперечное — от 20 до 65 %. Полеты были выполнены дважды — в летний сезон (2 июня 2023 г.) и в зимний сезон (30 марта 2024 г.). В обоих случаях схема залета и использованные сенсоры были идентичны. Полеты выполнялись с использованием пилотируемого носителя (Ан-2).

Аэрофотосъемка и лазерное сканирование производились одновременно. Разрешение фотоснимков составило от 7 до 13 см, плотность лазерного сканирования — от 2 до 12 точек на 1 м<sup>2</sup>. Это соответствует требованиям м-ба 1: 500 и 1: 1 000 с запасом по детальности и плотности сканирования.

Точки лазерных отражений различных по времени залетов (2023 и 2024 гг.) были разделены на классы «Земля», «Здания и сооружения», «Растительность», «Прочее». По точкам класса «Земля» были созданы триангуляционные и матричные модели поверхности грунта, далее они были использованы для создания топографических планов м-бов 1: 500 и 1: 1 000 [Gorgens, 2017], по ним же созданы и модели рельефа в среде UNITY. За базовую модель рельефа была принята модель, построенная по материалам летних съемок.

Для увеличения уровня реализма в ВММ применено звуковое сопровождение (ветер), создана модель неба и облаков (без анимационных эффектов), смоделирована дымка на больших дистанциях. Освещение модели имитирует летний полдень.

Для облегчения ориентирования «на местности» используется карта-врезка (при необходимости может быть свернута), Указывая мышью нужную локацию на карте-врезке, пользователь может быстро переместиться в указанную на карте-врезке точку.

Модель поверхности грунта, покрытая снегом (по материалам залета от марта 2024 г.) была использована для создания модели толщины снежного покрова. Модель толщины снежного покрова была представлена в матричной форме с шагом 1 м и визуализируется в виртуальной модели как тематический отключаемый растровый слой данных. Подобный подход к расчету толщины снежного покрова (обычно эти сведения используются для расчета снеговых запасов для их оптимального использования и продления сезона катания на трассах) был описан в наших предыдущих работах на примере схожей задачи в Красной Поляне [Тикун, Рылский, 2020].

Моделирование искусственных сооружений не проводилось. Предполагается выполнение данного этапа на последующих стадиях совершенствования данной модели.

Особенностью данной модели является внесение в модель облака точек лазерных отражений класса «Растительность». Данная опция существенно увеличивает информационную насыщенность модели, позволяя показать большое число объектов на поверхности без их генерализации. В то же время визуализация десятков миллионов точек лазерных отражений накладывает более серьезные требования в части вычислительных мощностей ПК пользователя. Тем не менее, благодаря сегментации [Рылский, 2022] подгрузки данных лазерного сканирования удалось обеспечить устойчивую реализацию в реальном времени на ПК с 16 Гбайт оперативной памяти.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подготовленные наборы геоинформационных данных были подвергнуты сегментации (в основном использована сетка сегментов 400 x 400 м, но прорабатывается и переход на сетку 100 x 100 м). Сегментация данных и создание на каждый сегмент пирамидальных слоев необходимы для ускорения подгрузки данных, оптимизации объемов загружаемой информации, использования сведений о дальности для объекта для выбора нужного уровня детализации сегмента [Капралов, 2004]. В отличие от предыдущих моделей, сегментация была проведена не только для растровых и TIN-данных, но и для трехмерных точек лазерных отражений.

В результате комплексирования вышеупомянутых данных и программно-аналитических функций для работы с пространственными запросами была выполнена компиляция в EXE-файл с прилагаемой базой данных. Данное приложение позволяет визуализировать в реальном времени (по аналогии с трехмерными компьютерными играми) трехмерную сцену с выбранными режимами отображения и наборами данных, осуществляя ее облет в реальном времени. Полученная виртуальная модель пригодна для использования на операционных

системах Windows 7, 8, 10, 11. Модель не требует инсталляции, и работает после простого переписывания ее на жесткий диск нужного персонального компьютера. Обязательным условием является работа с SSD-диска для обеспечения максимально быстрой загрузки данных. Рекомендованное разрешение экрана — FullHD (1920 x 1080), однако возможна визуализация в режимах 2560 x 1440 и далее, вплоть до 4K. Конечная детальность создаваемой «картинки» ограничена производительностью видеокарты пользователя и ее предельным разрешением. Рекомендованная видеокарта — RTX 3050 или лучше. Итоговый объем виртуальной модели составляет 12.6 Гбайт. Для запуска необходимы 16 Гбайт оперативной памяти и процессор уровня производительности Intel Core i7.

### Общее описание модели

Основой модели является ЦМР, представленная в виде TIN-модели [Lohr, 1997], оптимизированной с использованием ключевых точек перегиба рельефа. Это обеспечивает рациональное использование ресурсов ПК и минимизирует нагрузку на процессоры. Основным режимом является визуализация рельефа в реальных пропорциях высот (вертикальный м-б 1: 1), но для низменных, плоских и/или слабо расчлененных участков предусмотрен вертикальный м-б 1: 2).

ЦМР текстурируется целевыми наборами растровых данных. Среди них отметим:

- ортофотопланы летние;
- ортофотопланы зимние;
- карта высот с нанесенными горизонталями и текстовыми отметками высот (окрашена с использованием градиентной гипсометрической шкалы высот);
- карта углов наклона;
- карта экспозиции склонов;
- карта глубины снежного покрова;
- растеризованные топографические планы (м-б 1: 1 000);

В каждый момент времени пользователь видит один слой, смешение слоев (в виде работы с полупрозрачностью или иные способы) в модели не реализовано.

Основное средство управления моделью и навигации в ней — мышь и клавиши перемещения курсора. Все прочие запросы переключаются с использованием кнопок экрана. В модели представлены 2 варианта облета (в режиме «Вращение вокруг объекта» и в режиме «Вертолет/вращение головой»).

Наиболее частым запросом пользователей является измерение. В модели предоставляется возможность выполнения измерений длин отрезков в плане (при этом отображается длина, горизонтальное проложение, перепад высот, уклон (в процентах), периметров, площадей, а также высоты точек лазерных отражений над поверхностью рельефа (рис. 5).

Для обеспечения простейшего импорта и экспорта векторной информации в модель или из модели используется формат KML (изначально созданный для приложения Google Планета Земля). Данный формат удобен тем, что может быть переведен в любой другой векторный ГИС-формат пространственных данных. Пользователь также может самостоятельно создать в пространстве модели свои векторные объекты (точечные, линейные, площадные) и экспортировать их вовне. Формат данных KML — текстовый, что дает возможность использовать его с минимальными затратами усилий для разработчиков подобных моделей. В то же время не предполагается, что пользователи будут загружать значительные объемы данных в этом формате (на текущий момент — ограничение до 16 000 полигонов). Пользователь в пространстве модели и в режиме изометрического вида (с любого ракурса) может самостоятельно оцифровать контуры интересующих его объектов

(при этом можно «доворачивать» модель для достижения оптимального для рисования ракурса прямо в процессе рисования).

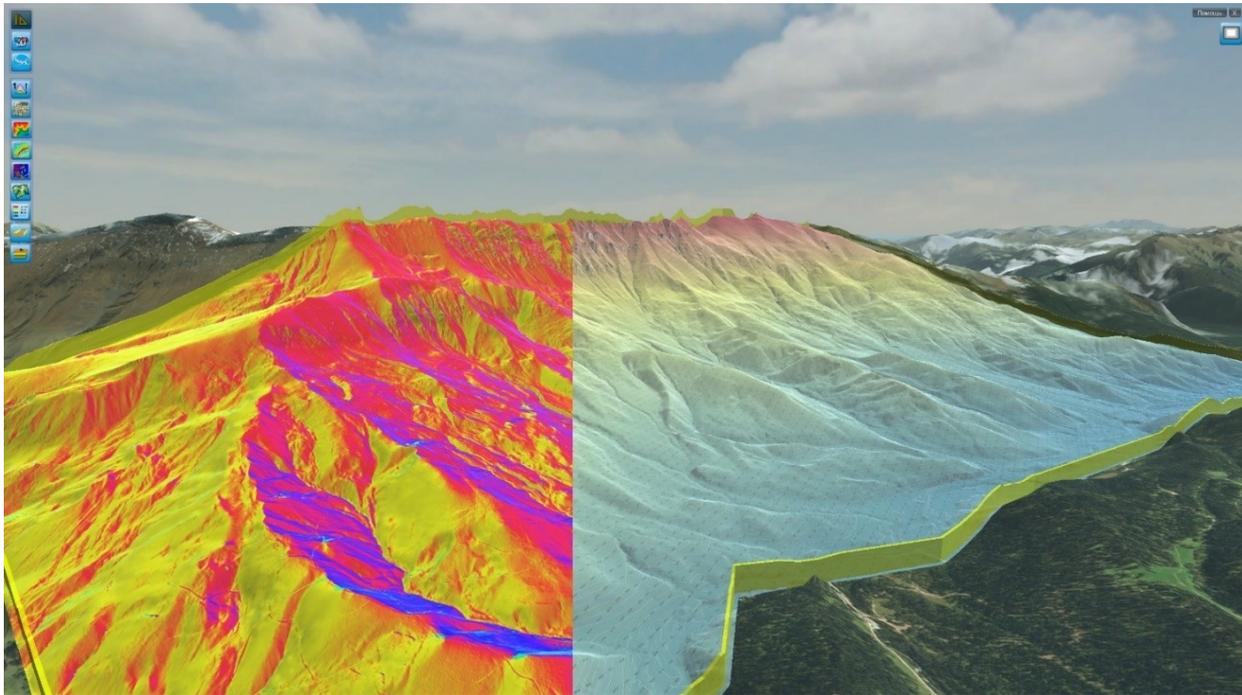


Рис. 3. Виды слоев-текстур: слева — карта экспозиции склонов, справа — карта высот с нанесенными отметками высот.  
Fig. 3. Types of texture layers: on the left — slope aspect map, on the right — elevation map with plotted contour lines

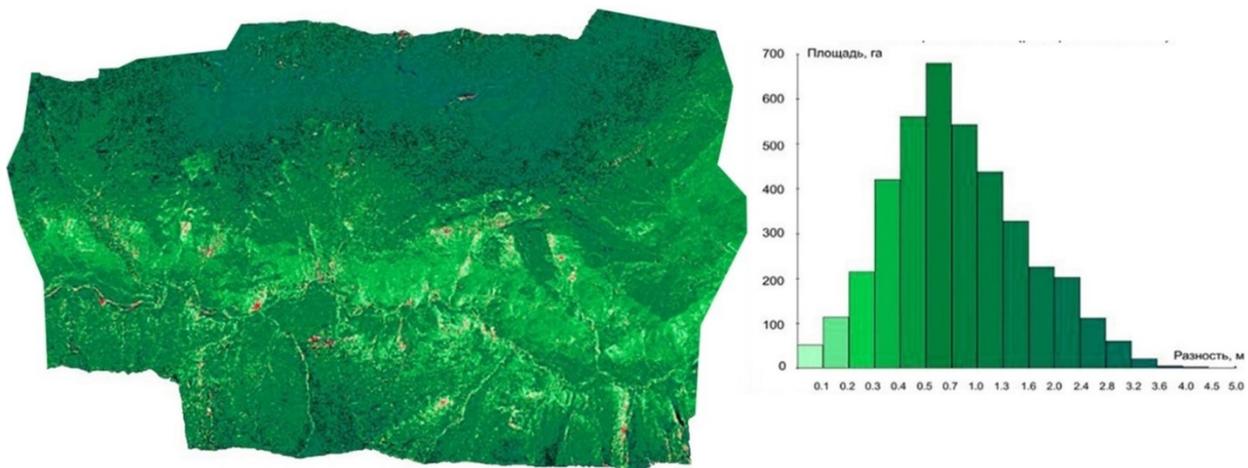


Рис. 4. Распределение толщины снежного покрова  
Fig. 4. Distribution of snow coverage



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

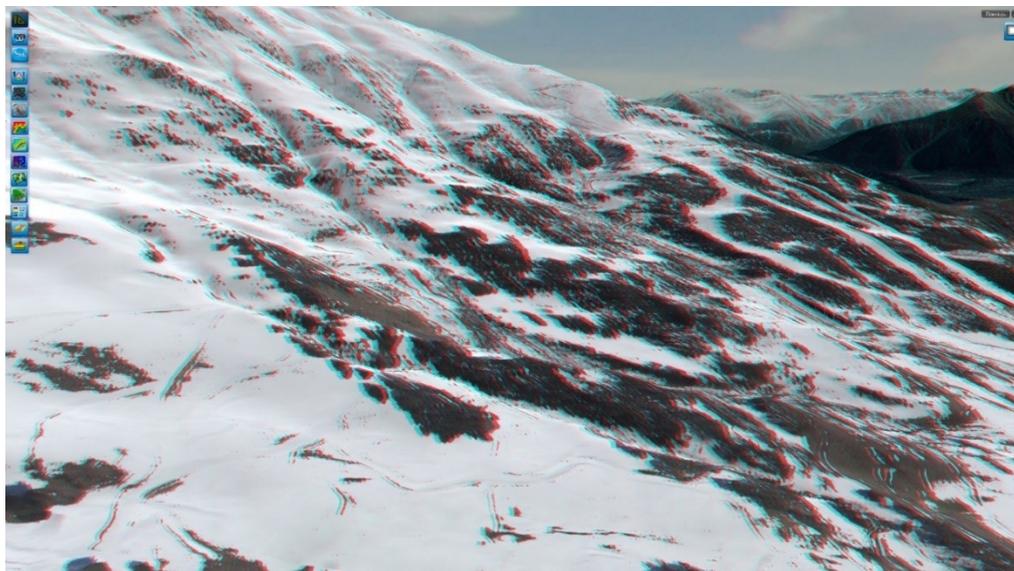
Детальность полученной модели позволяет визуально дешифровать опасные инженерные процессы и объекты — такие как карст, лавинные лотки, оползневые участки, осыпи и пр. (рис. 6).



*Рис. 6. Потенциальные лавиноопасные участки*  
*Fig. 6. Zones of potential avalanches*

Для обеспечения возможности наблюдения стереоэффекта пользователем или группой пользователей в модели предусмотрена возможность визуализации в анаглифическом режиме (посредством двухцветных очков, см. рис. 7). При необходимости модель также может быть доработана для навигации в режиме управления без мыши с использованием touch-экранов или визуализационных столов. Отметим, что работа в стереорежиме или без

мышь делает выполнение измерений и/или оцифровку контуров малоэффективной и неудобной. Таким образом, данные режимы подходят скорее не для аналитических, а чисто визуализационных задач.



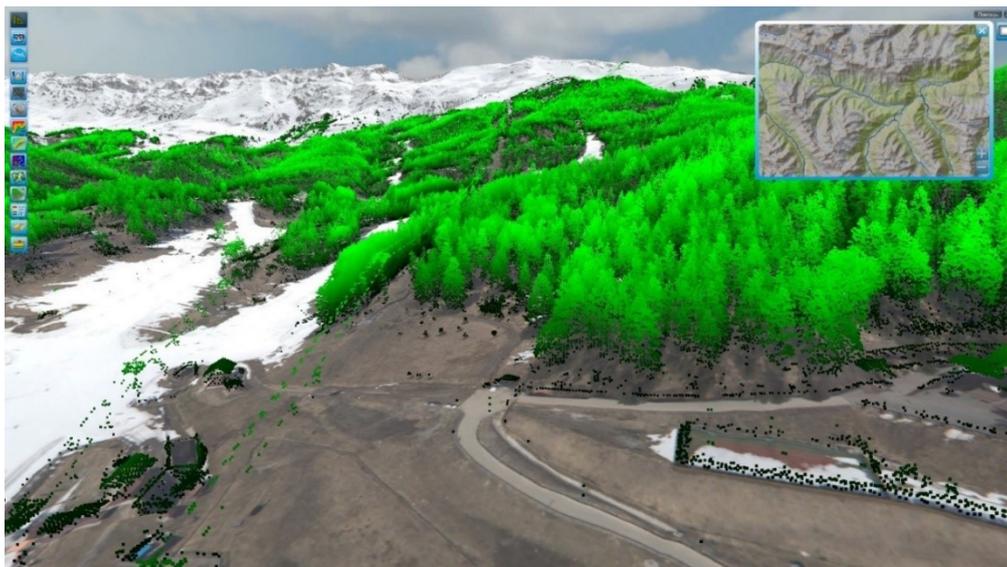
*Рис. 7. Анаглифическая стереовизуализация*  
*Fig. 7. Anaglyph stereo visualization*

Принципиально новой особенностью данной модели является возможность визуализации в ней плотного облака точек лазерных отражений (ТЛО). Отметим, что визуализация ТЛО является очень трудной задачей для 3D графических приложений, и она мало где реализована в подобной форме. Действительно, визуализация ЦМР в формате TIN на территорию такой площади (4 600 га, 43 км<sup>2</sup>) потребует использования примерно 800 000 вершин и задействует примерно 1,5 млн граней. При этом будет достигнута точность и подробность рельефа на уровне 1: 1 000 с шагом горизонталей 0.5 м, а ТЛО под м-б 1: 1 000 будут иметь плотность от 2 т/м<sup>2</sup> на открытой местности и до 12 т/м<sup>2</sup> в лесах, всего — до 140 000 000 точек, из них около 60 000 000 ТЛО — точки отражения от растительности и иных надземных объектов.

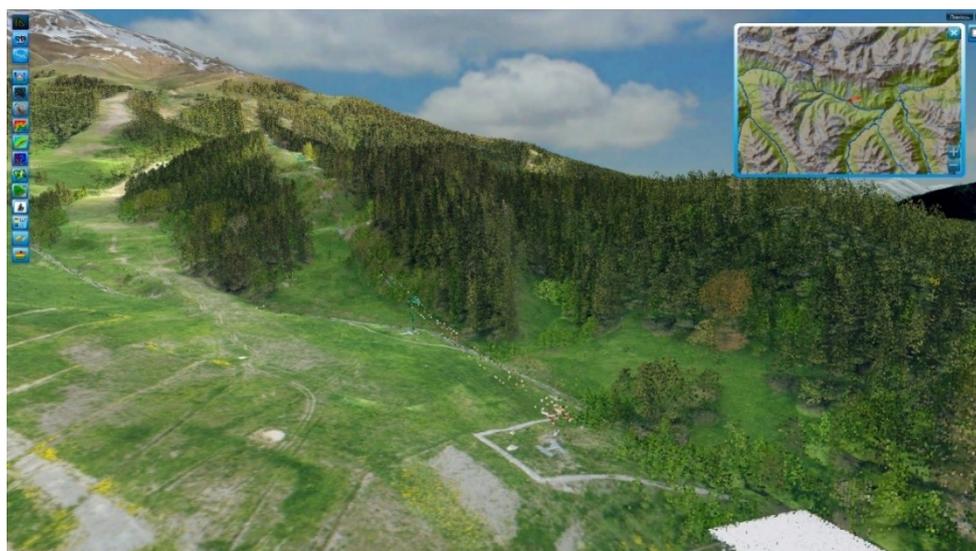
Неоднозначным является также вопрос назначения ТЛО цветов. Возможные подходы:

- назначение обычного цвета с постоянной светимостью, на которую не влияют источники света в модели;
- назначение градиентных цветов, меняющихся по мере нарастания относительной высоты над рельефом (рис. 8);
- раскраска ТЛО с использованием прямого проецирования данных с фотоснимков (реальные цвета, рис. 9).

В данной модели к точкам класса «Растительность» отнесены как точки отражений от растительного покрова, так и точки надземных искусственных объектов — подъемники, здания, провода и тросы и т. д. Точки данного класса на рис. 8 расцвечены в соответствии с их относительной высотой над поверхностью рельефа, что позволяет видеть трехмерную структуру данного облака без генерализации и упрощений. Всего в модели использовано 60 млн точек данного класса. Данная форма представления более удобна для аналитики.



*Рис. 8. Точки лазерных отражений класса «Растительность»; интенсивность нарастает по мере увеличения относительной высоты над рельефом*  
*Fig. 8. Laser reflection points of the “Vegetation” class; the intensity increases as the relative height above the terrain increases*



*Рис. 9. Точки лазерных отражений класса «Растительность», реальные цвета*  
*Fig. 9. Laser reflection points of the “Vegetation” class, real RGB colors*

Отображение точек в реальных цветах делает анализ менее наглядным, зато значительно повышает реализм модели, обеспечивая эффект присутствия на местности, который практически недостижим никакими другими средствами сбора данных дистанционного зондирования. Этот режим более подходит для чисто демонстрационных целей.

К сожалению, выбранная идеология построения закрытых виртуальных моделей на базе 3D-движков вроде Unity или Unreal Engine обладает рядом недостатков, мешающих неограниченному развитию данного направления в сторону «сращивания» с ГИС. Большая часть материалов пространственного характера должна вноситься в модель до, а не после процесса компиляции EXE-файла. Поэтому импорт и экспорт данных в нее крайне

затруднен, а для многих видов данных (вроде векторных чертежей в форматах САПР) — невозможен.

Совершенствование данных моделей может идти несколькими путями:

- экстенсивный путь — наращивание потенциально возможных объемов визуализируемых данных (в т. ч. при задействовании более мощных ПК), увеличение детальности данных за счет добавления в модель данных не только воздушного, но и наземного/мобильного сканирования, заранее созданных более детальных 3D-моделей, полученных по данным БПЛА или ручного моделирования;
- интенсивный — наращивание функциональности анализа в рамках возможностей, предоставляемых 3D-движками, оптимизация скорости работы на ПК с недостаточными ресурсами, разработка новых визуальных средств показа трехмерной информации (инструменты работы с прозрачностью, цветовыми шкалами и т. п.).

В настоящее время технические возможности и практика реализованных проектов позволяют говорить о технической возможности визуализации моделей с территориальным охватом на уровне 10 000 км<sup>2</sup> с детальностью 1: 50 000–1: 100 000, содержащими более детальные участки общей площадью до 350 км<sup>2</sup>, выполненные на масштабном уровне 1: 1 000–1: 2 000.

## ВЫВОДЫ

Созданная виртуальная модель имеет ряд отличий, несвойственных другим продуктам аналогичного типа:

1. В модели использованы мультисезонные снимки (сезоны зима и лето); возможно, позднее будут добавлены осенние снимки. Эта возможность позволяет более детально оценить визуальную составляющую ландшафта в разные сезоны, что важно для обеспечения туристических ожиданий максимально широкого круга посетителей.
2. В модели есть сведения о толщине снегового покрова, причем покрытие носит сплошной характер. Полученные материалы важны не только для проектирования и строительства горнолыжных трасс и подъемников, но и для оценки опасных процессов, а также могут быть полезны рядовым посетителям, желающим получить ответ о возможных районах катания в начале и конце сезона.
3. В модель добавлено полное плотное облако точек класса «Растительность», что потребовало разработки новых инструментов и подходов к оптимизации визуализации при работе со столь сложным и объемным набором пространственных данных.

Новые слои данных, созданные в рамках работы над данной моделью, ее мультимасштабность в сочетании с большой буферной зоной вокруг объектов непосредственного интереса, а также возможность визуализации плотного облака ТЛЮ позволяют пользователям решать старые аналитические задачи на качественно новом уровне, решать новые аналитические задачи (глубина и объемы снега, опасные процессы в летний и зимний периоды и пр.), а также достичь ранее невозможного уровня реализма при визуализации виртуальной среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Капралов Е. Г., Кошкарёв А. В., Тикунов В. С.*, Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.

*Рыльский И. А., Парамонов Д. А., Кожухарь А. Ю., Терская А. И.* Создание виртуальной модели района Большой Сочи – Красная Поляна – плато Лаго-Наки. ИнтерКарто. ИнтерГИС, Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий:

Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 1. 589–606. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-589-606.

*Рыльский И. А., Кожухарь А. Ю., Терская А. И.*, Создание виртуальных моделей местности при проектировании портовых комплексов по данным лидарной съемки. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 540–555. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-540-555.

*Тикунов В. С., Рыльский И. А.* Подходы к определению толщины снежного покрова с использованием лазерного сканирования. Геодезия и картография, 2020. № 8. С. 28–41. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-962-8-38-48.

*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. DOI: 10.14358/PERS.83.5.343.

*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. III International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

*Mukul M., Srivastava V., Jade S., Mukul M.* 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. DOI: 10.14358/PERS.83.5.343.

*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.

*Kapralov E. G., Koshkarev A. V., Tikunov V. S.*, Fundamentals of geoinformatics. M.: Akademia (Academy), 2004. P. 480.

*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. III International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

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

*Rylskiy I. A., Paramonov D. A., Kozhukhar A. Y., Terskaia A. I.* Creation of virtual model of the area of Big Sochy – Krasnaia Polyana – Lagonaki plateau. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 1. P. 589–606 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-589-606.

*Rylskiy I. A., Terskaia A. I., Kozhukhar A. Y.* Creation of virtual model of the area of Big Sochy – Krasnaia Polyana – Lagonaki plateau. *InterCarto. InterGIS*, 2022. No. 28. P. 540–555.

*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. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-962-8-38-48.

*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.