

УДК: 912.4

DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-304-316

И.А. Рыльский¹

СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ НА БАЗЕ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ НУЖД СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

АННОТАЦИЯ

Выполнение сейсморазведочных работ является краеугольным этапом освоения новых месторождений и возобновления добычи на старых лицензионных участках добычи углеводородов. Эти работы предполагают изучение подземных геологических структур с использованием методов сейсмопрофилирования и сейсмотомографии. Практика показывает, что детальные сведения о территории необходимы практически каждому участнику процесса – для нахождения оптимальных маршрутов движения по неподготовленной местности, для оптимизации объемов рубок леса на профилях, для геопривязки и проверки измерений координат на пунктах, для корректного планирования и оперативного смещения положения профилей и ряда иных задач. Наличие пространственных данных важно и для повышения уровня безопасности и безаварийности при выполнении работ.

Одним из возможных выходов из этой ситуации является переход на выполнение съемок месторождений методом аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования с последующим созданием на базе полученных материалов виртуальных моделей с инструментарием, адаптированным под особенности данных работ.

Современные ГИС при всей их развитости не лишены ряда недостатков. А именно: сложность в освоении неспециалистами; необходимость либо использовать полнофункциональные дорогие пакеты, либо – бесплатные решения с крайне ограниченным функционалом по анализу и невозможностью качественной трехмерной визуализации, сложность защиты весьма дорогостоящей пространственной информации от несанкционированного копирования. Указанные проблемы могут быть решены без использования ГИС-пакетов. Вместо них предлагается использовать закрытые от редактирования и доступа к исходным данным виртуальные среды.

В качестве тестового участка для отработки технологий виртуального моделирования была выбрана территория площадью 69 км² на территории Ханты-Мансийского автономного округа, где в течение съемочного сезона 2020 г. проводились работы по воздушному лазерному сканированию, аэрофотосъемке и последующей обработке полученного массива данных. В статье рассматриваются основные особенности и функционал данной модели.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъемка, виртуальная модель, дистанционное зондирование, лидар, лазерное сканирование, геоинформационные данные

¹ Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119234, Москва, Россия; e-mail: rilskiy@mail.ru

Ilya A. Rylskiy¹

LIDAR VIRTUAL MODELS FOR SEISMIC EXPLORATION

ABSTRACT

Seismic exploration is important for development of new fields and the resumption of production at old areas of oil production. These works involve studying of underground geological structures using seismic profiling and seismotomography methods. In fact, detailed information about the territory is necessary for almost every participant in the process – to find the optimal routes for movement on terrain, to optimize the volume of forest felling on profiles, for georeferencing and checking coordinate measurements at points, etc. The availability of spatial data is also important for increasing the level of safety and trouble-free operation during work.

One of possible solutions is to perform field surveys using aerial photography and airborne laser scanning, followed creation of virtual models based on them with instrumentation adapted to the specifics of these works.

Modern GIS, with all their development, has number of disadvantages. It is difficult to use GIS by non-specialists; full-featured GIS are expensive, and free solutions has limited analysis functionality and can't make good 3D visualizations, it is difficult to protect spatial information from unauthorized copying. These problems can be solved without using classic GIS packages. Instead, it is proposed to use virtual environments closed from editing and access to the original data.

Test area of 69 km² in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug was selected for testing virtual modeling technologies. LIDAR and aerial photography datasets were obtained, and subsequent processing of the resulting was done, forming highly-detailed virtual environment. The article discusses the main features and functionality of this model.

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

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение сейсморазведочных работ является краеугольным этапом освоения новых месторождений и возобновления добычи на старых лицензионных участках добычи углеводородов. Эти работы предполагают изучение подземных геологических структур с использованием методов сейсмопрофилирования и сейсмотомографии. Для этих целей на исследуемом участке располагается обширная сеть пунктов возбуждения (ПВ) и пунктов приема (ПП), на которых производится возбуждение и регистрация сейсмических волн. Характер принятых сигналов и время их получения, будучи проанализированы в совокупности, позволяют построить детальную картину трехмерного строения участка земной коры на значительную глубину (до нескольких километров).

Организация подобных работ является сложным и дорогостоящим мероприятием, включающим целый ряд подготовительных и производственных этапов: проектирование профилей и точек расположения пунктов (возбуждения и прием), геопривязка указанных пунктов, учет влияния рельефа дневной поверхности, собственно сейсмопрофилирование и моделирование подземных структур, а также их соотнесение с истинными высотами рельефа, и прочее. Все это предполагает длительное (несколько месяцев) и массированное (могут быть одновременно задействованы десятки единиц техники и сотни людей) использование пространствен-

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Center for Geography, Moscow, 119991, Russia; e-mail: rilskiy@mail.ru

ных данных, качество которых напрямую влияет на точность и себестоимость получаемых работ. В то же время сложность в применении и интерпретации пространственных данных при использовании стандартных ГИС (ArcGIS, MapINFO) делает работу с пространственной информацией невозможной для большинства непрофессиональных пользователей, работающих на подобном проекте.

Практика показывает, что детальные сведения о территории необходимы практически каждому участнику процесса – для нахождения оптимальных маршрутов движения по неподготовленной местности, для оптимизации объемов рубок леса на профилях, для геопривязки и проверки измерений координат на пунктах, для корректного планирования и оперативного смещения положения профилей и ряда иных задач. Наличие пространственных данных важно и для повышения уровня безопасности и безаварийности при выполнении работ [Капралов, 2004].

Несмотря на высокую значимость использования детальной пространственной информации, на практике существуют две проблемы, мешающие этому. Это уже упомянутая необходимость работы в сложных ГИС-пакетах большого числа слабо подготовленного к этому персонала и недостаточная актуальность и детальность существующего на текущий момент фонда пространственных данных (топокарты, архивные данные съемок, топопланы).

Одним из возможных выходов из этой ситуации является переход на выполнение съемок месторождений методом аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования с последующим созданием на базе полученных материалов виртуальных моделей с инструментарием, адаптированным под особенности данных работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Источники данных для создания виртуальных моделей (ВМ) для сейсморазведки

Существующие источники данных для информационного обеспечения задач сейсморазведки недостаточны. Из имеющихся в фактическом (а не теоретическом) наличии можно отметить топографические карты масштаба 1:25000 с сечением рельефа 10 м и оценочной точностью рельефа на уровне 3.5–5.0 м, космические снимки с детальностью 0.5–1.0 м (в лучшем случае) и – крайне редко – топографические планы масштаба 1:10000 возрастом в несколько десятков лет.

Напротив, для целей выполнения сейсморазведки (с современными требованиями в части точности и подробности результатов) необходимы данные о рельефе с детальностью на уровне 1:2000 (высотная точность 0.3–0.5 м), данные аэрофотосъемки (детальность 0.1–0.15 м), сведения о высоте и сомкнутости древостоя (для оценки проходимости местности и необходимости проведения рубок на профилях), углах наклона территории, необходимы и векторные материалы с детальностью 1:2000–1:5000 с общегеографической нагрузкой. Кроме того, все эти данные должны быть не старше 1–2 лет.

Таким образом, фондовые материалы, доступные для использования, не подходят для информационного обеспечения проектов по сейсморазведке. Космические съемки, а также аэрофотосъемки с БПЛА, не дающие сведений о рельефе и микрорельефе местности под пологом леса, также не облегчают ситуацию.

Фактически, на сегодняшний день единственным методом информационного обеспечения подобных проектов является проведение одновременного воздушного лазерного сканирования и цветной аэрофотосъемки территории в видимом (в перспективе – и тепловом) диапазоне. Этот метод без труда позволяет обеспечить данными с детальностью 1:1000–1:2000 огромные по объему территории, по цене, сопоставимой с проведением космической стереосъемки и последующего моделирования видимой поверхности [Chen, 2007]. При этом обеспечивается принципиально иное качество выполнения работ.

Данные, производные от материалов аэрофотосъемки и лазерного сканирования

Непосредственными результатами лазерного сканирования и аэрофотосъемки является облако точек и фотоснимки с элементами внешнего ориентирования [Малеванная, 2014]. Однако собственно точки лазерного сканирования не являются топологически связными данными (в отличие от векторных топологических слоев ГИС или регулярно-ячеистых моделей данных) и крайне неудобны для непосредственного применения. Поэтому на практике пользователь всегда имеет дело в некими продуктами обработки данных исходного залета [Haala, 1998]. Среди них можно выделить несколько уровней обработки:

- Уровень 0. Классифицированное облако точек и уравненный фотограмметрический блок снимков.
- Уровень 1. Матрица высот, ортофотопланы.
- Уровень 2. TIN-модель в формате CAD (DWG), матрица относительных высот растительности, матрица углов наклона, матрица экспозиции склонов.
- Уровень 3. Векторные слои общегеографической и тематической нагрузки [Zhang, 2001], карта проходимости растительности (создается по материалам совокупного анализа матрицы высот и матрицы относительных высот растительности на основе статистических закономерностей данной территории, рассчитанных с использованием метода скользящего окна).

Для практического применения необходима вся совокупность данных со всех уровней обработки [Тикунов, 2016].

Необходимость использования виртуальных моделей вместо ГИС при проведении сейсморазведочных работ

Современные ГИС при всей их развитости не лишены ряда недостатков. К ним можно отнести:

- сложность в освоении неспециалистами;
- необходимость либо использовать полнофункциональные пакеты, стоящие дорого, либо использовать бесплатные решения с крайне ограниченным функционалом по анализу и невозможностью качественной трехмерной визуализации;
- сложность защиты весьма дорогостоящей пространственной информации от несанкционированного копирования;
- при работе в поле без каналов Интернет все данные на территорию участка должны быть записаны на полевой ноутбук пользователя вместе с лицензионным программным обеспечением, что крайне затратно и технически малореализуемо.

Следует отметить, что большинство задач в практике информационного обеспечения сейсморазведки – за исключением сугубо камеральных аналитических работ – относятся к категории простейших. К ним можно отнести:

- визуальную оценку оптимального маршрута с точки зрения рельефа, проходимости растительности;
- оценку превышений и абсолютных высот точек на местности;
- оценку протяженности объектов или их периметра;
- обход водных преград или иных препятствий (ветровалы, сбросы, обрывы);
- получение и редактирование несложных ГИС-данных (векторных) в части планируемых работ и точек съемки;
- оценка углов наклона (с целью определить проходимость тяжелой техники и возможность или невозможность расположения в выбранной точке пунктов возбуждения или приема).

Все указанные задачи легко могут быть реализованы без использования ГИС-пакетов. Вместо них предлагается использовать закрытые от редактирования и доступа к исходным данным виртуальные среды.

Концептуальные и технические требования к виртуальным моделям для нужд сейсмопрофилирования

На основании вышеизложенных требований к составу данных и существующих недостатков, возникающих при использовании ГИС, были сформулированы следующие требования к созданию [Allen, 2003] типовой виртуальной модели лицензионной площади:

- модель должна иметь простейший и максимально понятный интерфейс и набор инструментов, предназначенный для использования людьми без картографического образования и навыков работы с ГИС;

- модель должна обеспечивать максимально доступный уровень реализма ландшафта;

- модель должна обеспечивать возможность 3D-визуализации в разрешении Full HD (1920×1080) или детальнее в реальном времени;

- наборы данных, входящих в состав модели, должны быть представлены в закрытой форме, исключающей возможность несанкционированного копирования данных из состава модели с целью предотвращения нецелевого использования пространственной информации из состава модели;

- модель не должна использовать ни одно из существующих ГИС-приложений в качестве оболочки (для снижения затрат и снятия необходимости взаимодействия заказчиков в правообладателями указанных ГИС);

- модель должна быть создана в форме, обеспечивающей возможность установки на неограниченное количество рабочих мест;

- детальность и точность информации в составе данной модели должна быть на уровне масштаба 1:2000 с сечением рельефа 1 м. Модель должна обеспечивать возможность проведения измерений плановых координат в условной системе координат, а высотных отметок – в принятой системе высот проекта (Балтийская 1977 года).

Выбор участка и получение данных

В качестве тестового участка для отработки технологий виртуального моделирования была выбрана территория площадью 69 км² на территории Ханты-Мансийского автономного округа, где в течение съемочного сезона 2020 г. проводились работы по воздушному лазерному сканированию, аэрофотосъемке и последующей обработке полученного массива данных.

Территория характеризуется в целом слабой расчлененностью. Преобладают плоско-равнинные ландшафты пойм и надпойменных террас. Территория практически полностью покрыта лесом (тайга), значительный объем территорий пройден рубками, и в настоящее время там происходят активные процессы восстановления лесного покрова. Обширная часть территории заболочена или переувлажнена.

Климат территории резко-континентальный, вегетационный период достаточно короткий. Основной объем работ на территории (ввиду всего перечисленного) выполняется в зимнее время, когда проходимость заболоченной местности улучшается.

Участок является достаточно репрезентативным в плане как физико-географических условий, так и в части площади и целевой детальности данных. Кроме того, участок подлежал (на тот момент) немедленному освоению в части начала сейсморазведки, и актуальность проведения подобных работ была весьма высока.

Набор полученных пространственных слоев (ГИС-слоев) включал в себя:

- ортофотопланы 1:2000 с детальностью 14 см;

- цифровая модель рельефа в матричной форме с шагом 1 м и высотной точностью около 25 см;

- векторные слои горизонталей (шаг – 1 м);

- растровая карта категорий растительности (районирование территории по категориям проходимости транспорта по трем категориям проходимости);

- карта углов наклона местности.

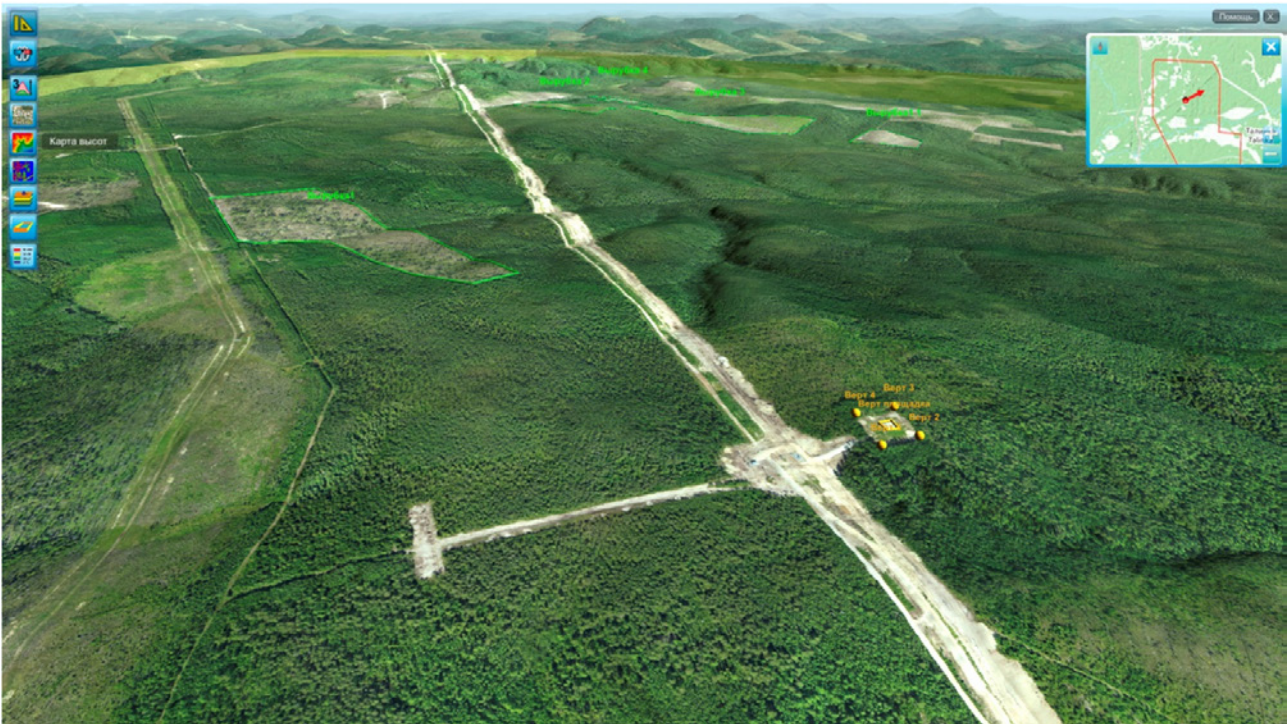


Рис. 1. Главный экран созданной виртуальной модели
 Fig. 1. Main window of the virtual model

Целевой масштаб работ – 1:2000. Назначение – информационное обеспечение комплекса сейсморазведочных работ (3Д-сейсмика). Данный вид работ предполагает значительный объем буровых работ для закладки пунктов возбуждения и пунктов приема сейсмосигналов, локализацию на этой же территории полевого лагеря, организацию и функционирование большого количества персонала и техники в течение длительного времени.

Количество потенциальных пользователей подобного набора данных – свыше 100 человек в течение не менее 3 месяцев каждый. Обеспечение такого количества персонала (с зачастую околонулевой квалификацией в части ГИС-технологий) навыкам работы со стандартными ГИС-пакетами и закупка подобного количества рабочих мест является практически неразрешимой задачей. К тому же это крайне дорого.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типы виртуальных моделей местности и их недостатки

Виртуальная модель местности – это математическая модель местности, содержащая в себе информацию о рельефе земной поверхности, ее спектральных яркостях и объектах, расположенных на данной территории, предназначенная для интерактивной визуализации и обладающая эффектом присутствия на местности. Для создания и визуализации виртуальной модели местности с достаточно высокой степенью реалистичности требуется применение программ, способных обрабатывать трехмерные объекты, «драпированные» («обтянутые») текстурой (растровыми картами либо снимками).

Виртуальные модели местности (пример см. на рис. 1) давно и прочно вошли в практику работы с геоинформационными данными. Значительная часть ГИС-пакетов (например, ArcGIS или ERDAS) предлагают уже готовые инструментарии для работы с заранее подготовленными массивами ГИС-данных (включая их подготовку и редактирование) для последующей загрузки в состав формируемой виртуальной модели местности. Подобный сервис доступен пользователям уже начиная с конца 1990-х годов и не претерпел значительных изменений.

Виртуальные модели данного типа обычно отличает низкая реалистичность, использование условных текстур, однотипность и невысокое разнообразие библиотек объектов, значительная степень условности. При значительном богатстве функций по редактированию и созданию ГИС-данных, эти модели нуждаются (при необходимости их использования) в наличии основного ГИС-приложения (например, ArcGIS), что немедленно ограничивает количество потенциальных пользователей данного типа моделей (стоимость лицензии на одно рабочее место у подобного программного обеспечения может достигать свыше 10000 евро).

Также можно отметить и специализированные программные решения для создания виртуальных моделей из готовых данных без возможности редактирования исходных материалов – например, SpaceEye. При несколько меньшей стоимости одного рабочего места для редактирования и наличии бесплатного приложения для просмотра уже готовой виртуальной модели, этот тип программных решений сохраняет все недостатки вышеперечисленных ГИС-пакетов в части реализма, и при этом не обладает функционалом по редактированию самих данных. Это вынуждает пользователей подобных решений заодно приобретать и полнофункциональные ГИС – для того, чтобы иметь возможность хоть что-то изменить в данных.

Появление и внедрение в широкое пользование технологий съемок с БПЛА предложило рынку и пользователям новый класс виртуальных моделей, основанных на фотореалистичных текстурах и поверхностях фактического расположения объектов. Этот класс виртуальных моделей также широко распространился и обладает рядом выраженных достоинств и недостатков (в большей степени). Примером подобных решений (в виде самостоятельных приложений, не связанных с Интернет) является Sputnik от Геоскан, использующий данные, ранее обработанные в Metashape. Существуют и онлайн-ресурсы, предлагающие работу с виртуальными моделями в режиме доступа по каналам Интернет. Наиболее известный их представитель – Google Earth. Все сервисы данного типа в большей степени основаны на работе с данными космических съемок (реже – аэрофотосъемок, в основном – на города развитых стран).

Таким образом, можно разделить виртуальные модели по типам данных, на использование которых они нацелены: ГИС-ориентированные виртуальные модели, а также БПЛА, и ДДЗ-ориентированные модели. Виртуальные модели и среды, ориентированные на использование данных лазерного сканирования и сопутствующих им данных, в широком употреблении не встречаются. В то же время, ввиду все более широкого использования данных лазерного сканирования в практике промышленного применения, все чаще возникает необходимость в создании виртуальных моделей, особенности создания и использования которых учитывают специфику именно данных воздушного лазерного сканирования.

Выбор платформы для создания виртуальной модели и ее функционала

В качестве платформы для реализации концепции, изложенной нами выше, была выбрана платформа виртуального моделирования UNITY. Unity – это кросс-платформенная среда разработки виртуальных интерактивных сред, разработанная американской компанией Unity Technologies. Unity дает возможность разрабатывать отдельные приложения, работающие на более чем 25 различных платформах, включающих персональные компьютеры, игровые консоли, мобильные устройства, интернет-приложения и иные. Первый релиз Unity состоялся в 2005 г., и с того времени идет постоянное развитие данной программной среды. С использованием Unity созданы тысячи виртуальных сред, приложений, визуализаций математических моделей, которые охватывают множество платформ и задач. При этом Unity используется как крупными разработчиками, так и небольшими коллективами.

Основными преимуществами Unity являются:

- наличие визуальной среды разработки;
- возможность межплатформенной поддержки;
- модульная система компонентов.

К недостаткам относят появление сложностей при работе с многокомпонентными схемами и затруднения при подключении внешних библиотек. С точки зрения текущей задачи следует также отметить, что непосредственная подгрузка материалов (геоданных) в среду затруднена и требует доработки (сегментации, генерализации, прочее). В ряде случаев прямая трансляция данных (например, векторные полигональные данные) в среду невозможна, и необходимо осуществлять перевод материалов из векторной в растровую форму, либо создавать квази-3Д объекты (объекты, которые по сути трехмерны, но из-за вырожденности третьей координаты они визуализируются аналогично двумерным).

Собранный и подготовленный набор данных и программно-описанных функций (по управлению визуализацией, координатным запросам и прочее) подвергается окончательной сборке и итоговой компиляции, после чего набор исходных данных превращается в набор закрытых бинарных данных, визуализируемых с помощью самостоятельно работающего EXE-приложения. Подобная «сборка» не требует инсталляции, и при запуске обеспечивает возможность выбора качества расчета 3Д-сцен, разрешающей способности экрана и далее обеспечивает работу со всем набором данных в виде 3Д-визуализации в режиме реального времени.

Указанные сложности с лихвой окупаются достигаемыми преимуществами:

- закрытость от копирования информации (несанкционированное использование информации напрямую невозможно, декомпиляция крайне затруднена);
- простота интерфейса и необходимый минимум функций;
- небольшие размеры (до 2 гигабайт дискового пространства);
- нетребовательность к ресурсам компьютера (8 Гб оперативной памяти и процессор Intel Core i5 – вполне достаточно);
- очень хорошее качество визуализации и стабильность работы.

Общее описание модели

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], карта проходимости территорий по категориям). Виды слоев текстур представлены на рис. 2.

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

Ввиду малых перепадов высот, но большой значимости даже незначительных (несколько метров) возвышенных участков, в модель была заложена функция увеличения вертикального масштаба (в 3 раза, по команде включения режима, см. рис. 3).

Модель поддерживает комплекс измерений (высот, длин, периметров, превышений, площадей, рис. 4) и обеспечивает возможность обращения к атрибутике векторных объектов, хранящихся в формате KML (текстовый формат Google Earth, рис. 5). Данный формат принят как основной обменный формат для векторных данных. Пользователь самостоятельно может загрузить точечные, линейные, полигональные ГИС-сведения в данном формате, выполнить редактирование (как данных, так и стилей их отображения), и осуществить выгрузку и сохранение результатов во внешние файлы [Allen, 2003].

Таким образом, данная виртуальная модель полностью реализует весь набор требований, предъявляемых к ГИС, при этом обеспечивая ряд преимуществ (закрытость данных, хорошее качество рендеринга, легкость в освоении интерфейса неподготовленными людьми и прочее).

Помимо упомянутых функций, модель обеспечивает возможность работы в режиме 3Д-анаглиф (стереовизуализация посредством цветных очков), может управляться с использованием touch-экранов, обеспечивает возможность облета по заранее заданной траектории.

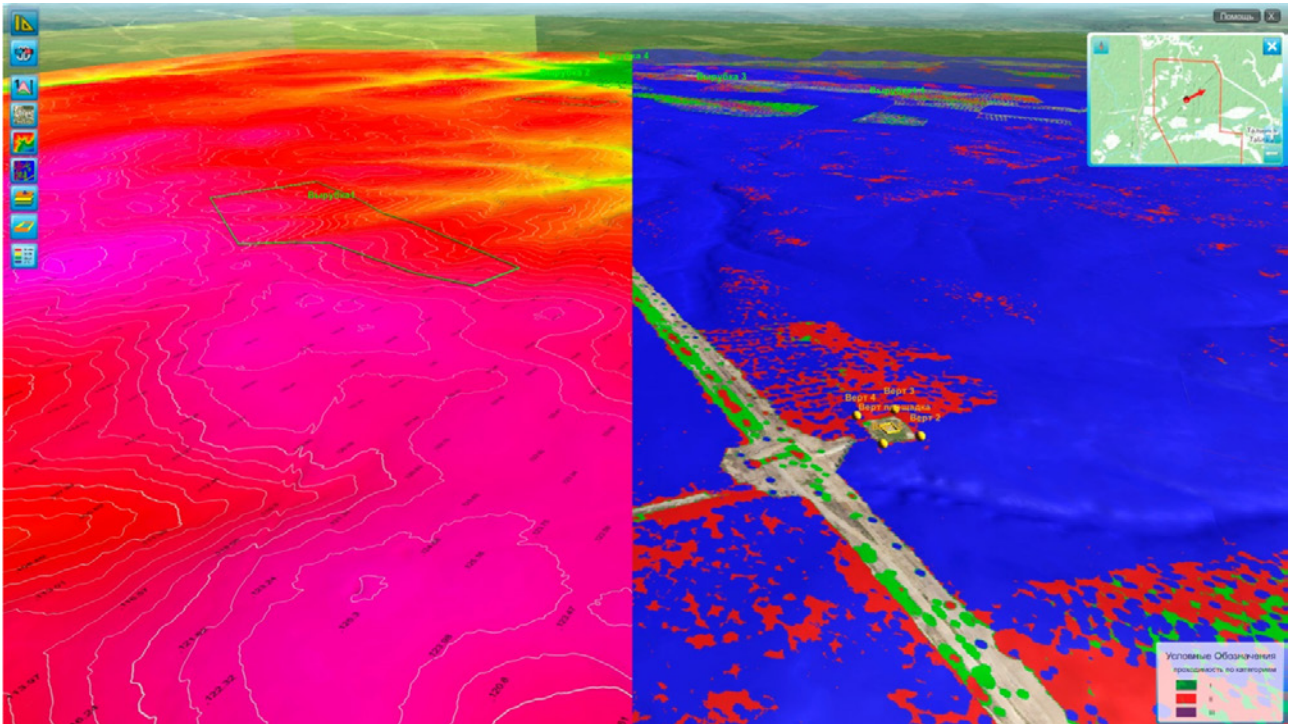


Рис. 2. Виды слоев-текстур: слева – гипсометрическая карта, справа – карта проходимости растительности (по категориям)
Fig. 2. Types of texture layers: left – hypsometric map, right – vegetation permeability map

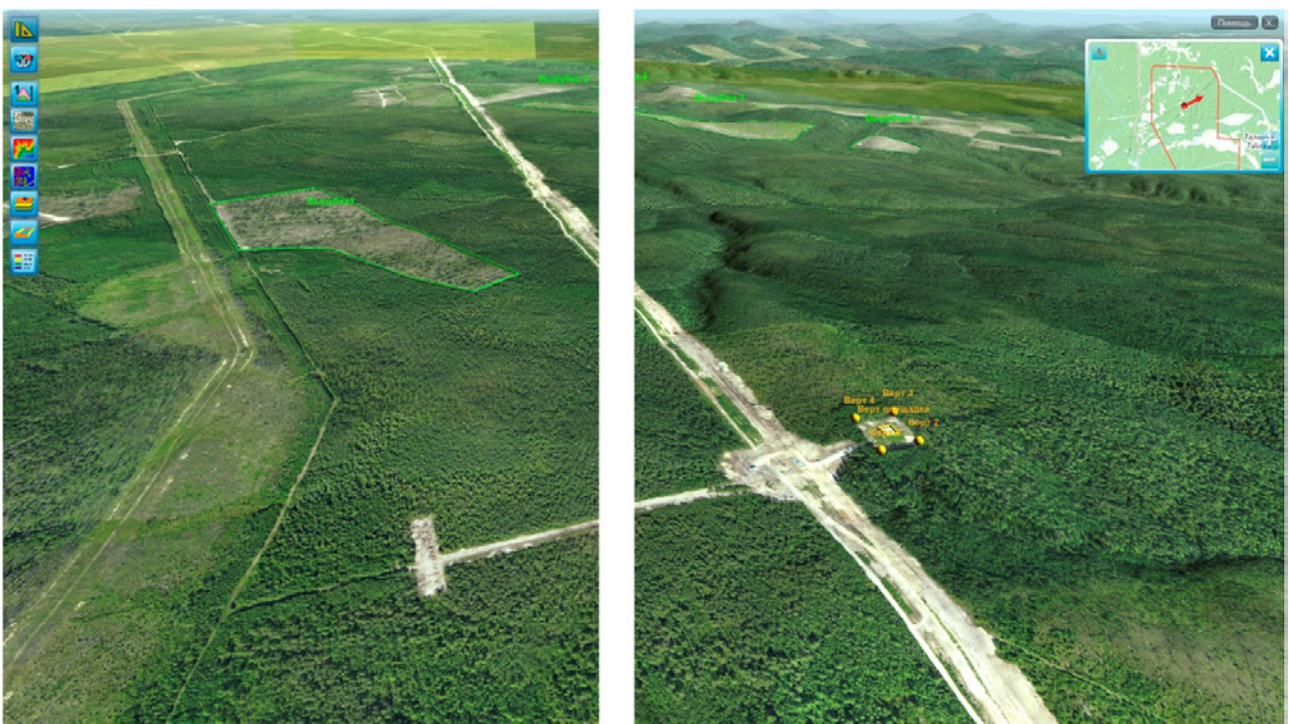


Рис. 3. Изменение вертикального масштаба: слева – 1 к 1, справа – 3:1
Fig. 3. Exaggeration of relief: left – real scale, right – 300 % exaggeration

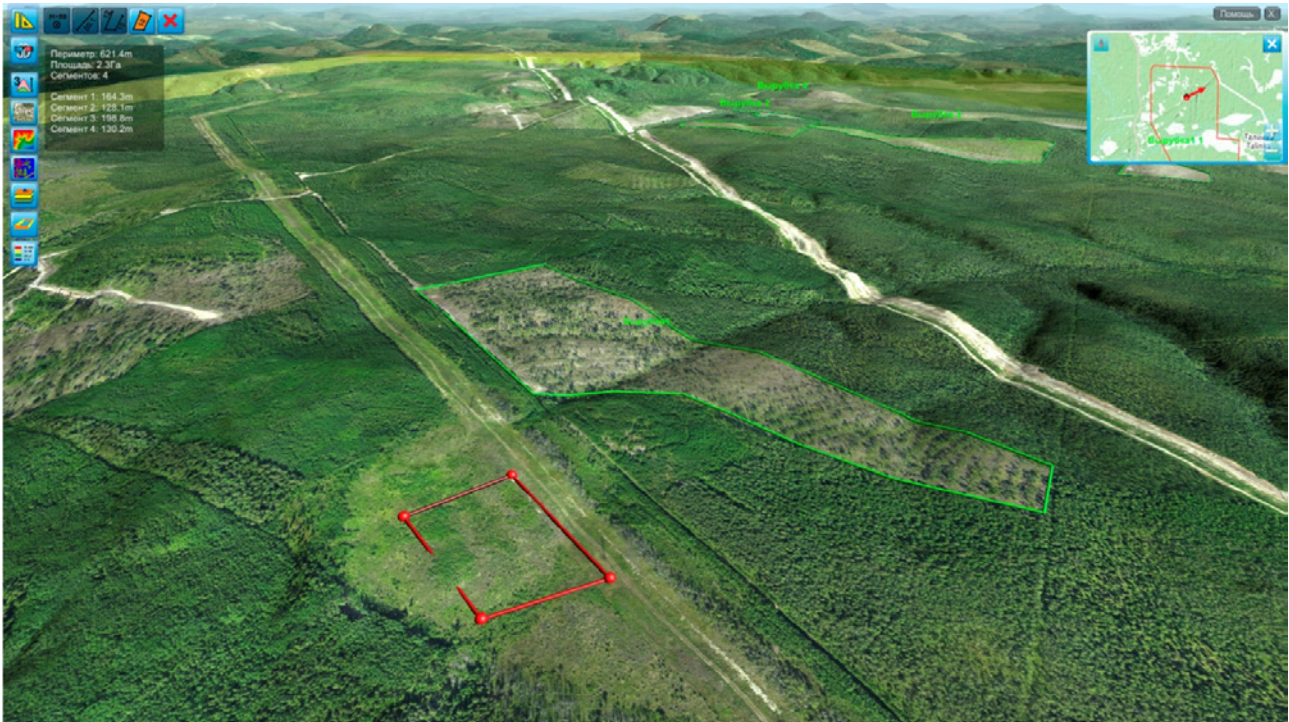


Рис. 4. Измерение длин и площадей в модели
 Fig. 4. Measuring length and area of the polygon in model

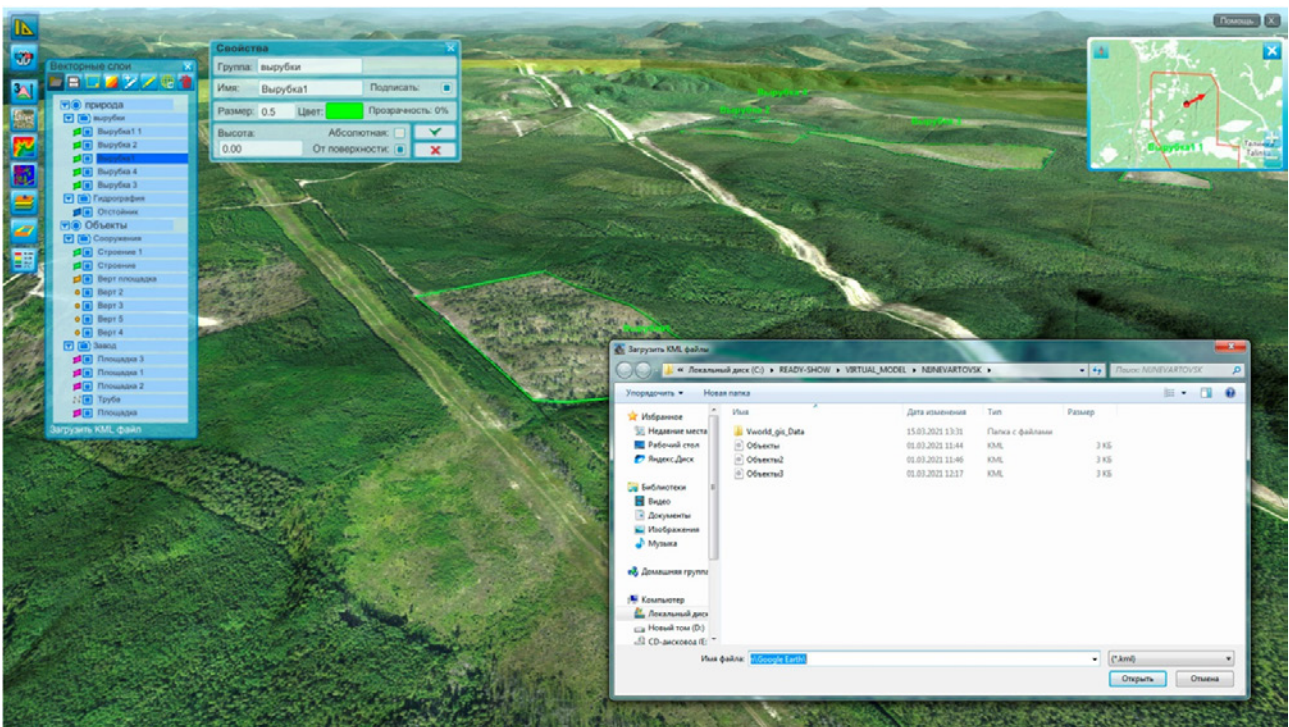


Рис. 5. Работа со слоями данных в формате KML
 Fig. 5. KML data layer panels

Преимущества описанного подхода

Приципиальными преимуществами данного подхода к созданию виртуальных моделей и информационному обеспечению широкого круга работ в целом являются:

1. Возможность работать с высокодетальным набором пространственных данных в регионах, не обеспеченных сетью Интернет.
2. Возможность тиражирования модели на неограниченное количество рабочих мест без дополнительных затрат.
3. Низкие требования к аппаратным ресурсами при высоком качестве графики.
4. Невозможность несанкционированно извлечь и присвоить пространственные данные, что невозможно обеспечить при использовании классических ГИС-пакетов для виртуального моделирования территорий.
5. Простота освоения неподготовленными людьми.

ВЫВОДЫ

После создания и отладки данной модели (что заняло достаточно много времени – было создано до 8 версий) данные прошли тестовую эксплуатацию у представителей компании-заказчика аэрофотосъемочных работ. По результатам тестирования пользователи остались довольны реализацией выбранных концепций (закрытость данных, простота, компактность, отсутствие необходимости инсталляции, дешевизна). Основные пожелания касались расширения круга используемых типов растровых слоев. Именно поэтому в ближайшем будущем подключаемые слои будут дополнены картами:

- углов наклона;
- экспозиции склонов;
- растеризованными картами общегеографической нагрузки масштаба 1:2000-1:5000;
- картами относительных высот растительности;
- тепловизионные фотопланы.

Другим направлением изучения является оценка пределов площадей, на которых подобная концепция может быть реализована с последующей эксплуатацией подобных систем на пусть мощных, но все же персональных (а не специализированных) компьютерах. В настоящее время расчеты и тесты показывают возможность обеспечения беспрепятственной работы моделей с аналогичным составом и детальностью на персональных компьютерах с процессорами Intel Core i7 и 32 Гб оперативной памяти при площади территории до 1000 км². Это позволяет говорить о возможности применения данного подхода не только на небольших участках, но и на целых месторождениях.

Несомненно, ключевую роль в возможности создания подобных виртуальных моделей, которые обеспечивают не только высокую точность, но и высокую реалистичность, играет применение метода воздушного лазерного сканирования совместно с аэрофотосъемкой [Schwalbe, 2005]. Только указанный метод способен обеспечить разовое получение детальной картографической основы.

К сожалению (несмотря на широко распространенное заблуждение о равноценности аэрофотосъемки и лазерного сканирования), аэрофотосъемка – даже с беспилотников – не дает пользователю самого главного: модели рельефа под кронами деревьев. Вместо них пользователю предлагается суррогат – так называемая «цифровая модель поверхности», которая никоим образом не соответствует рельефу в лесной и лесотундровой зонах. Создание подобных моделей, базирующихся на высокоточной цифровой модели рельефа и прочих данных, рассчитанных на ее основе (углы наклона, экспозиция, высоты деревьев, проходимость лесов, модели стока) возможно только на базе данных воздушного лазерного сканирования.

Внедрение подобных моделей в практику работы геолого-разведочных компаний на всех уровнях ведения деятельности (от высшего управленческого звена до непосредственных

работников на месторождении) является эффективным методом популяризации ГИС-подходов к работе с пространственной информацией и простым и действенным способом информационного обеспечения проектов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной тематики исследований Регионального центра Мировой системы данных (Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова) при содействии ООО «Проектстрой».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed within the framework of a state budget theme of Regional Center of World Data System (Geographical Faculty of Moscow State University) in a collaboration with JSC «Ark-on».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Малеванная М.С., Рыльский И.А.* Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований. *Геодезия и картография*. М., 2014. Т. 5. № 4. С. 23–34.
3. *Тикунов В.С., Рыльский И.А.* Перспективы использования комплексов воздушного лазерного сканирования для картографирования лесов. *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о земле*. 2016. Т. 15. № 2073–3402. С. 104–113.
4. *Allen P.K., Stamos I., Troccoli A.A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y.* 3D modeling of historic sites using range and image data. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2003. V. 1. P. 145–150.
5. *Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.
6. *Haala N., Brenner C., Anders K.-H.* 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1998. P. 339–346.
7. *Lohr U.* Digital elevation models by laserscanning: Principle and applications. *Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*. 1997. P. 174–180.
8. *Schwalbe E., Maas H., Seidel F.* 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. In *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 2005. P. 12–14.
9. *Zhang C., Chen T.* Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation. In *Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing*, 2001. P. 935–938.

REFERENCES

1. *Allen P.K., Stamos I., Troccoli A.A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y.* 3D modeling of historic sites using range and image data. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003. V. 1. P. 145–150.
2. *Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.
3. *Haala N., Brenner C., Anders K.-H.* 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1998. P. 339–346.
4. *Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S.* *Osnovy geoinformatiki*. Moscow: Akademia, 2004. 480.
5. *Lohr U.* Digital elevation models by laserscanning: Principle and applications. *Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*. 1997. P. 174–180.

6. *Malevannaya M.S., Rylskiy I.A.* Terrestrial laser scanning methods – new approaches to information provision of geographic researches. *Geodezia I cartographia*. 2014. V. 5. No. 4. P. 23–34.
 7. *Schwalbe E., Maas H., Seidel F.* 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. In *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 2005. 12–14.
 8. *Tikunov V.S., Rylskiy I.A.* Perspectives of using airborne laser scanning systems for forest mapping. *Izvestia Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, Seria Nauki o zemle*. 2016. V. 15. No. 2073–3402. P. 104–113.
 9. *Zhang C., Chen T.* Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation. In *Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing, 2001*. 2001. P. 935–938.
-