УДК: 912.4 **DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-540-555**

И.А. Рыльский[1], А.Ю. Кожухарь[2], А.И. Терская[3]

СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ПО ДАННЫМ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ

АННОТАЦИЯ

Проектирование портовых комплексов – сложный и комплексный процесс, требующий учета не только географических, но и экономических особенностей территории. Наряду с работой в пределах береговых ландшафтов, в проекте должны быть учтены особенности морских ландшафтов и их техногенных элементов – фарватеров, глубин, причальных стенок, опасных объектов и прочего. Опыт реализации подобных проектов говорит о том, что высокоточные географические сведения о районе работ нужны всем участникам процесса проектирования – для оптимизации расположения береговых объектов, инфраструктурных решений, подвода линий энергообеспечения, водоводов, продуктопроводов, сопутствующих сооружений. Наиболее перспективным на сегодняшний день методом геоинформационного обеспечения подобных проектов является проведение лидарной съемки территорий портовых комплексов с одновременным выполнением надирной и перспективной аэрофотосъемок. В дальнейшем эти материалы, в совокупности с данными дистанционного зондирования космического базирования на окружающие объект территории, применяются для создания виртуальных моделей с инструментарием, адаптированным под пользователей со средним и низким уровнем подготовки к работе с ГИС-данными. На данном этапе геоинформационные системы имеют ряд недостатков. В первую очередь это сложность в освоении неспециалистами. Полнофункциональные ГИС-пакеты весьма дороги при закупке, кроме того, использование значительных по объему наборов пространственных данных пользователями, рассредоточенным по различным населенным пунктам, требует высокоскоростных каналов доступа в Интернет (проектирование портовых комплексов требует усилий крайне разнородных специалистов, проживающих в разных городах и работающих в разных отраслях). Предлагаемый в данной работе подход позволяет устранить вышеперечисленные недостатки без использования ГИС-пакетов. В качестве замены считаем возможным использовать закрытые от редактирования и доступа к исходным данным виртуальные среды. В качестве тестового участка была выбрана территория площадью 2 400 км^2 на территории Камчатского края в районе бухты Бечевинка. Полученная виртуальная модель территории будущего портового комплекса представляет собой удобное средство для повышения пространственной осведомленности пользователей, закрытое от несанкционированного доступа. В ходе работ успешно удалось реализовать функционал и возможность использования данной модели на обычных компьютерах в сочетании высокой пространственной точностью 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**

[2] Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия *e-mail:* **ann3105880@yandex.ru**

[3] Московский государственный университет, Факультет космических исследований, Ленинские горы, 1, стр. 52, 119991, Москва, Россия *e-mail:* **arvin2@yandex.ru**

Ilya A. Rylskiy[1], **Anna Yu. Kozhukhar**[2], **Anna I. Terskaia**[3]

CREATING VIRTUAL MODELS FOR DESIGNING PORT COMPLEXES BASED ON LIDAR DATA

ABSTRACT

The design of port complexes is a process that requires considering geographical and economic features of the territory. It is necessary to aggregate the characteristics of coastal landscapes, seascapes, artificial elements, dangerous objects, etc. The experience of implementing such projects (for example, in Sabetta) suggests that all participants in the design process need highly precise geographical information to optimize the location of coastal facilities, infrastructure solutions, power supply lines, water conduits, product pipelines, and related structures. As for now, the best method of geoinformation support of such projects is LIDAR (with simultaneous nadir and perspective aerial surveys). In the future, these materials, combined with space-based remote sensing data on the surrounding areas, would be used for creating virtual models with tools adapted for users with an average and low-level GIS data experience. Nowadays geoinformation systems have a number of disadvantages. First and foremost, it is difficult for non-specialists to master them. Full-featured GIS packages are expensive and cannot be used by a significant number of specialists, dispersed over various settlements only using high-speed internet connections (designing port complexes requires the efforts of heterogeneous specialists living in different cities and working in different industries). The approach proposed in this paper allows to solve this problem without using GIS packages. We consider it possible to use virtual environments that are closed from editing and access to the source data. An area of 2400 km^2 in the territory of Kamchatka Peninsula near Bechevinka Bay was chosen as a test site. The resulting virtual model of the territory of the future port complex is a convenient tool for increasing the spatial awareness of users, closed from unauthorized access. The work has successfully achieved the functionality and usability of this model on conventional computers, combined with the high spatial accuracy of the model.

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

ВВЕДЕНИЕ

Строительство или реконструкция крупных портовых комплексов, в частности, терминалов сжиженного природного газа (СПГ) – сложная и комплексная задача. При этих работах необходимо предпроектное проведение исследований как на территории наземных ландшафтных комплексов, так и акваторий будущего движения и стоянки судов. Как правило, подобные проектно-изыскательские работы являются достаточно длительным и дорогостоящим процессом, который требует привлечения десятков организаций различного профиля. Все эти организации имеют в своем составе специалистов с разнородной подготовкой в части работы с пространственными данными. Далеко не весь объем материалов изысканий доступен каждому из них, при этом значительная часть вовлеченного в работы персонала может вообще не обладать никакой подготовкой к ра-

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Center for Geography, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **rilskiy@mail.ru**

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Center for Geography, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **ann3105880@yandex.ru**

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Researches, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* **arvin2@yandex.ru**

боте с пространственными материалами. Руководители проектов часто имеют довольно смутное представление о расположении и особенностях территории.

Помимо вышесказанного, разные структуры и подразделения компаний, реализующих проект, работают с разнородными данными. Их детальность 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 материалы имеют разный пространственный охват и собираются разными методами. При их сведении воедино возникают сложности: от различий в проекциях до различий в методах привязки.

Следует отметить и значительные ограничения в части безопасности распространения данных, характерные для компаний, ведущих работы по подобным проектам. Значительная часть материалов, собранных в ходе подготовки к реализации проектов сооружения портовых комплексов, представляет собой ценность и коммерческую тайну. Они не должны свободно распространяться по открытым каналам связи или 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.

Достаточно распространенным методом решения подобного комплекса проблем и задач является создание виртуальных моделей с использованием ГИС-пакетов, доступных на коммерческом рынке, наиболее распространенные из которых – ArcGIS (ArcScene, ArcGlobe). Однако подобные продукты весьма дороги, непросты в освоении, не обеспечивают хорошего качества визуализации, предъявляют очень высокие требования к аппаратному обеспечению при посредственной производительности. Отдельные коммерчески доступные ГИС-пакеты и модули, созданные специально для виртуального моделирования (ERDAS Virtual GIS, Space Eye, прочие), обладают схожим набором недостатков.

Одним из возможных подходов может быть создание комплексных виртуальных моделей (сред) с полностью закрытой от редактирования или экспорта части данных географической основой. В качестве одного из наиболее перспективных методов информационного обеспечения данного подхода можно предложить создание виртуальных географических сред на базе 3D-ядра UNITY с дальнейшим развитием опций частичного импорта-экспорта пользовательских данных. Основным методом информационного наполнения подобной виртуальной модели предлагается метод лидарной съемки одновременно с проведением аэрофотосъемки.

Источники данных для создания виртуальных моделей (ВМ) для проектирования портовых комплексов. Существующие фондовые и открытые источники данных для информационного обеспечения задач проектирования портовых комплексов недостаточны. Из имеющихся в наличии можно отметить топографические карты масштаба 1:25 000 с сечением рельефа 5–10 м и оценочной точностью рельефа на уровне 1/3–1/2 от величины сечения горизонталей (1,7–5,0 м), данные космической съемки с пространственным разрешением не лучше 0,5–1,0 м, распространяемые на коммерческой основе; свободно распространяемые данные дистанционного зондирования с пространственным разрешением 10–30 м (космические аппараты Sentinel, Landsat, прочие); крайне редко – топографическая продукция масштаба детальнее 1:10 000 (как правило, сильно устаревшая). Представленные открытые источники информации о рельефе – такие как бесплатные AW3D30 (Alos DEM 30) или SRTM и платные данные – не обеспечивают точность и детальность лучше 1:50 000 [*Mukul* et al., 2017].

При этом для выполнения проектирования требуется использование данных с детальностью на уровне 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. Так, согласно СниП 11-02-96 «Инженерные изыскания в строительстве» на подобных уровнях детализации 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.

Как видим, фондовые материалы, доступные для использования, малопригодны для информационного обеспечения работ по проектированию для целей строительства. Данные космической оптической съемки, классической аэрофотосъемки, фотосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) не дают детальных сведений о рельефе и микрорельефе местности под пологом растительности. Данные космической радиолокационной съемки о рельефе либо слишком низкодетальны (при использовании более длинных волн), либо не дают сведений о рельефе, отражаясь от крон деревьев (при использовании более коротких длин волн).

Отдельно следует отметить, что, в отличие от городского или сельского строительства, где площади объектов редко превышают 50–100 га, работы по проектированию портовых комплексов могут охватывать территории площадью в десятки и даже сотни квадратных километров. Например, площадь Новороссийского порта, включая акваторию – 347 км^2. Это полностью исключает возможность решения всего круга задач с использованием любых наземных методов и диктует необходимость использования дистанционных съемочных методов, обеспечивающих максимальную точность и производительность.

На сегодняшний день единственным методом информационного обеспечения с требуемой детальностью является лидарное (лазерное) сканирование с пилотируемого носителя с одновременной цветной аэрофотосъемкой территории в видимом диапазоне (а также в ближнем инфракрасном и тепловом). Этот метод обеспечивает детальность, соответствующую масштабу 1:500–1:2 000 на значительных по площади территориях [*Chen*, 2007]. При этом цена может быть сопоставимой с проведением космической стереосъемки с последующим моделированием видимой поверхности. При этом гарантируется очень высокое качество и низкий процент погрешностей при выполнении работ. В частности, одной из наиболее ценных особенностей воздушного лазерного сканирования является способность лазерных импульсов проникать сквозь кроны деревьев, достигая земли и давая множественные отражения от одного импульса. Эта особенность позволяет не снижать качество отображения рельефа на материалах лидарной съемки, а также выполнять (при необходимости) дешифрирования подлеска, валежника и прочих объектов ниже главного яруса растительности [*Korpela*, 2008].

Данные, производные от материалов аэрофотосъемки и лазерного сканирования. Основную роль в возможности создания высокодетальных виртуальных моделей (которые сочетают высокую точность с высокой реалистичностью) играет использование технологии LIDAR совместно с аэрофотосъемкой [*Schwalbe* et al., 2005]. Исключительно данный метод способен обеспечить единовременное получение детальной картографической основы.

Непосредственными результатами лазерного сканирования и аэрофотосъемки являются облако точек и фотоснимки с элементами внешнего ориентирования, а также других сенсоров, установленных во время съемки на борту. Это могут быть наклонные камеры видимого диапазона, надирные сенсоры, работающие в тепловом и ближнем инфракрасном диапазонах, и т. д.

Сами по себе точки лазерного сканирования не являются топологически связными данными (в отличие от векторных топологических слоев ГИС или регулярно-ячеистых моделей данных), и работа с ними крайне затруднена. Как правило, пользователь всегда имеет дело с некими продуктами обработки данных исходного залета [*Haala* et al., 1998]. Здесь возможно выделить несколько уровней возможной обработки:

– Уровень 0. Облако точек лазерных отражений, разделенное на классы, а также уравненный 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) в формате CAD (DWG), матрицы относительных высот растительности, матрица углов наклона, матрица экспозиции склонов

– Уровень 3. Векторные слои общегеографической и тематической нагрузки [*Zhang, Chen*, 2001], карты 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.

Обоснованность применения виртуальных сред вместо геоинформационных пакетов при проведении проектно-изыскательской деятельности. Существующие геоинформационные системы при всем богатстве их инструментариев имеют ряд недостатков или негативных особенностей. Упомянем ряд из них:

– сложность в освоении людьми без специального образования или с иной специализацией;

– необходимость работы либо с полнофункциональными программными продуктам (высокая стоимость, мало рабочих мест), либо применять бесплатные решения с ограниченным функционалом в части анализа, проблемы с реалистичной трехмерной визуализацией.

– необходимость защиты от несанкционированного копирования пространственной информации; при этом для достижения оптимального качества вырабатываемых проектных решений число ее потенциальных потребителей необходимо увеличивать максимально;

– при работе на объектах в условиях отсутствия широкополосного доступа к сети Интернет пространственная информация о территории проведения работ должна быть записана на полевом рабочем месте пользователя вместе с лицензионным программным обеспечением.

Следует отметить, что многие лица, привлекаемые к работам по проектированию портовых комплексов, не являются опытными пользователями пространственных данных, но возможность их использования могла бы крайне положительно сказаться на их деятельности. Это в первую очередь касается руководящего состава, лиц, принимающих решения, логистов и ряда других, «непрофильных» пользователей пространственной информации. У пользователей, применяющих ГИС-данные вполне регулярно, наличие виртуальной модели также способно привести к повышению удобства работы и росту производительности труда.

Приведем пример регулярно возникающих, но при этом простейших задач. 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;

– оценку 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 проектирования портовых комплексов. Принимая во внимание упомянутые выше требования к составу и полноте данных, а также и существующие недостатки, возникающие при использовании ГИС, возможно сформулировать следующие требования к созданию виртуальной модели будущего портового комплекса [*Allen* et al., 2003]:

– виртуальная среда должна обладать несложным и понятным интерфейсом, содержать набор функций, понятных и пригодных к использованию людьми без картографического образования и навыков работы с ГИС;

– виртуальная среда должна обеспечивать высокую степень реализма ландшафта;

– должна быть обеспечена возможность трехмерной визуализации в реальном времени на персональном компьютере с разрешением экрана не ниже 1920x1080;

– пространственная информация, представленная в виртуальной среде, должна быть закрыта от несанкционированного копирования данных. Это необходимо для предотвращения кражи или неконтролируемого распространения пространственной информации в составе виртуальной среды;

– не должно применяться ни одно из существующих ГИС-приложений в качестве оболочки (для снижения затрат и снятия необходимости взаимодействия заказчиков с правообладателями указанных ГИС);

– виртуальная среда должна быть реализована в виде приложения, обеспечивающего возможность установки на сколь угодно большое количество рабочих станций пользователей.

– виртуальная среда должна обеспечить полноту и точность данных на нескольких масштабных уровнях:

- уровень 1: район строительства причальных сооружений и промышленных конструкций – 1:500, сечение рельефа 0,5 м. Источник данных – лидарная съемка, аэрофотосъемка, перспективная съемка с воздуха;
- уровень 2: районы, прилегающие к акватории порта в буферной зоне шириной до 2 000 м – 1:2 000, сечение рельефа 1,0 м. Источник данных – лидарная съемка, аэрофотосъемка;
- уровень 3: окружающие районы, включая ближайшие населенные пункты – на площади территории радиусом до 100 км. Детальность – 1:50 000 в части рельефа (источник данных – ALOS DEM) или 1:100 000 (SRTM), 1:25 000 – в части ортофотопланов (данные космической съемки с детальностью 3–10 м, различные сенсоры, данные из открытых источников).

– должна быть реализована возможность проведения измерений плановых координат и высотных отметок – в принятой системе высот проекта (Балтийская 1977 года).

− модель должна обеспечивать возможность импорта/экспорта пользовательских данных векторного топографического плана базе формата *.KML (формат данных для Google Earth); также должны быть представлены функции редактирования линейных, полигональных, точечных объектов.

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, расположены 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, созданные на базе геоинформационных данных, используются более 30 лет. Многие коммерческие ГИС (ArcGIS или ERDAS) предлагают уже готовые модули для работы с заранее подготовленными массивами ГИС-данных (включая их подготовку и редактирование) для последующей загрузки в состав формиру-

емой виртуальной модели местности. Виртуальные модели этого вида характеризуются низкой степенью фотореализма (используются условные текстуры, библиотеки объектов не слишком разнообразны, в значительной мере условны). При развитости функций по редактированию и созданию ГИС-данных эти модели нуждаются в наличии основного ГИС-приложения (например, ArcGlobe), что ограничивает количество потенциальных пользователей данного типа моделей (стоимость лицензии на одно рабочее место у подобного программного обеспечения может достигать свыше 10 000 евро).

Необходимо упомянуть и специальные программные среды для создания виртуальных моделей из готовых данных, которые не предусматривают возможности редактирования исходных материалов – например, SpaceEye. При меньшей стоимости рабочего места для приложения-редактора виртуальной модели и наличии бесплатного приложения для просмотра уже готовой виртуальной модели такие программных комплексы сохраняют все недостатки вышеперечисленных ГИС-пакетов в части реализма. При этом они не располагают функционалом по редактированию самих ГИС-данных. Это вынуждает пользователей подобных решений заодно приобретать и полнофункциональные ГИС – для того, чтобы иметь возможность хоть что-то изменить в данных.

Повсеместное распространение в последние годы технологий съемок с БПЛА или пилотируемых носителей создало рынок (и класс пользователей) виртуальных моделей, основанных на фотореалистичных текстурах и визуальных 3D-поверхностях объектов. Данный тип виртуальных моделей сейчас широко распространен и обладает рядом характерных сильных и слабых сторон. Примером таких решений (в виде stand-alone приложений, не нуждающихся в использовании сети Интернет) является Sputnik от AgiSoft, использующий данные, ранее обработанные в фотограмметрическом комплексе Metashape (от того же производителя). На рынке представлены и онлайн-ресурсы, реализующие работу с виртуальными средами в режиме доступа через Интернет, например, Google Earth. Сервисы такого вида в основном работают с данными космосъемок на незастроенных территориях и данными аэрофотосъемок – на города развитых стран.

Как видим, можно выделить несколько типов виртуальных моделей, основываясь на типах данных, которые используются для их построения:

– ГИС-ориентированные виртуальные модели,

– БПЛА- и ДДЗ-ориентированные модели.

Виртуальные модели и среды, ориентированные на использование данных лазерного сканирования и сопутствующих им данных, распространены мало. По мере все более широкого распространения данных лазерного сканирования, 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 программного «ядра» для реализации концепции создания виртуальных сред, 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 выпуск Unity имел место в 2005 году, и с того времени идет постоянное развитие данной программной среды. С использованием Unity создано огромное количество 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-3D объекты (объекты, которые по сути трехмерны, но из-за вырожденности третьей координаты они визуализируются аналогично двухмерным).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор участка и получение данных. В качестве тестового участка для отработки вышеописанной концепции была выбрана территория будущего портового комплекса в бухте Бечевинка, Камчатский край. Координаты бухты – 53°16′21″ с. ш. 159°47′ в. д., в 75 км к северо-востоку от г. Петропавловск-Камчатский. Бухта расположена практически в центре Шипунского полуострова, на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка.

До 1996 г акватория бухты и имеющиеся на берегу гарнизонные сооружения носили название Петропавловск-Камчатский-54. В бухте располагалась база дизель-электрических подводных лодок, комплекс причальных, складских и жилых сооружений. В 1996 г населенный пункт был покинут, база расформирована, население вывезено.

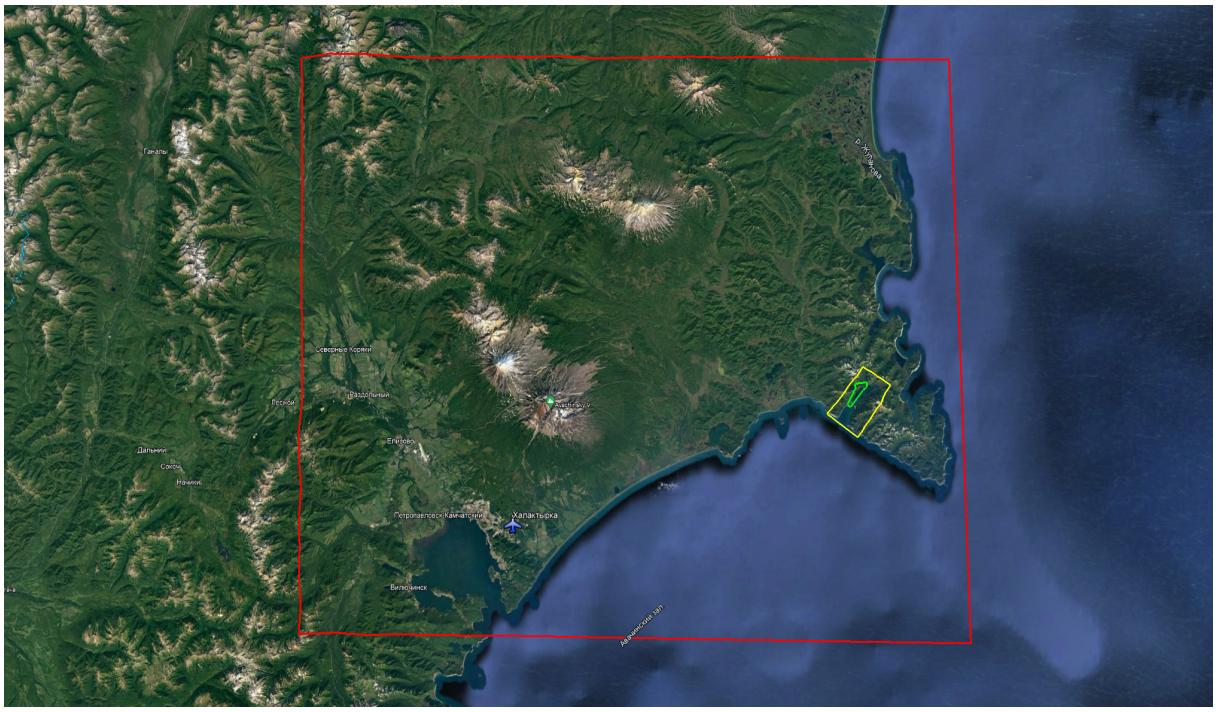

Рис. 1. Районы создания виртуальной модели.
Красный контур – уровень детальности 3, желтый контур – уровень детальности 2, зеленый контур – уровень детальности 1.
Fig. 1. Extent of virtual modelling levels. Red contour – level 3, yellow contour – level 2, green contour – level 1.

В настоящее время на территории бывшей базы планируется размещение перевалочного комплекса СПГ (сжиженного природного газа). Проект предусматривает полную перестройку территориального комплекса, причальных сооружений, строительство значительного количества новых объектов. Работы ведутся в интересах ПАО «НОВАТЭК».

Климат региона – умеренный морской с муссонным характером. Территория гористая, с выраженными альпийскими формами в пределах всего Шипунского полуострова.

Ближе к Петропавловску-Камчатскому рельеф становится вулканическим (комплексы Корякского, Авачинского, Козельского вулканов и прилегающие к ним ландшафты).

Поскольку г. Петропавловск-Камчатский является для данного проекта ближайшим городом, с которым в будущем планируется соединить строящийся терминал СПГ, было принято решение о включении в создаваемую модель территорий между Шипунским полуостровом вплоть до г. Петропавловск-Камчатский (см. рис. 1). При этом детальность данной информации было принято снизить до описанного выше уровня 3, так как назначение данного блока данных – сугубо обзорная функция. Прочие территории в полосе шириной до 2 000 м от уреза воды в пределах бухты Бечевинка были смоделированы на уровнях 2 и 1 в зависимости от наличия техногенной нагрузки, так как здесь предполагается возможность работы с использованием измерений, оцифровкой контуров и прочее.

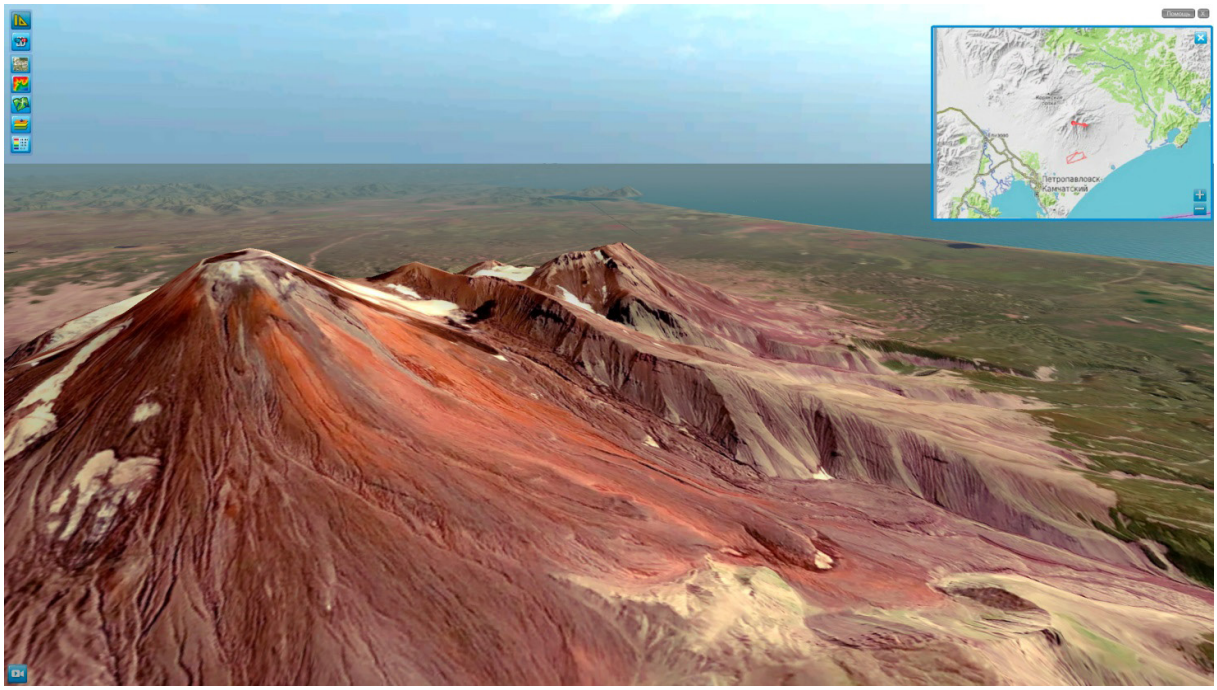

Рис. 2. Район Авачинского и Козельского вулканов. Моделирование с детальностью уровня 3. Использованы открытые источники данных
Fig. 2. Area of Avachinsky and Kozelsky volcanoes. Modeling with level 3 detail. Open data sources used

На территории бухты Бечевинка и прилегающих участков Шипунского полуострова была произведена лидарная съемка с одновременной аэрофотосъемкой. Лазерное сканирование выполнялось с использованием лазерного сканера RIEGL Q560, использовалась цифровая фотокамера IGI DigiCam 39 (среднеформатная авиационная камера с разрешением матрицы в 39 мегапикселов). Также производилась перспективная съемка с использованием длиннофокусного (105 мм) объектива и фотокамеры Canon 6D. 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 вертолета Ми8Т. Полеты выполнялись в сентябре 2018 г.

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

Аэрофотосъемка и лидарное сканирование производились одновременно. Работа велась с высоты 350–650 метров над поверхностью рельефа. Разрешение фотоснимков составило от 5 до 8 см, плотность лазерного сканирования – от 4 до 12 точек на 1 м^2. Это соответствует требованиям, которые предъявлялись к целевому масштабу работ – 1:500.

Отдельное внимание при создании модели было уделено демонстрации сложности захода в акваторию бухты современных крупнотоннажных судов-газовозов. С этой целью в виртуальной среде был смоделирован вход и выход по фарватерам бухты газовозного судна типа Moss (способен перевозит за один рейс до 95 млн м^3 газа). Для этого из открытых источников были взяты сведения по радиусам разворота, положению фарватера, скорости движения и осадке судна. Модель судна была взята в Интернете в бесплатном банке 3D моделей, отмасштабирована до реальных габаритов типа (открытые источники) и параметрически анимирована в среде Unity.

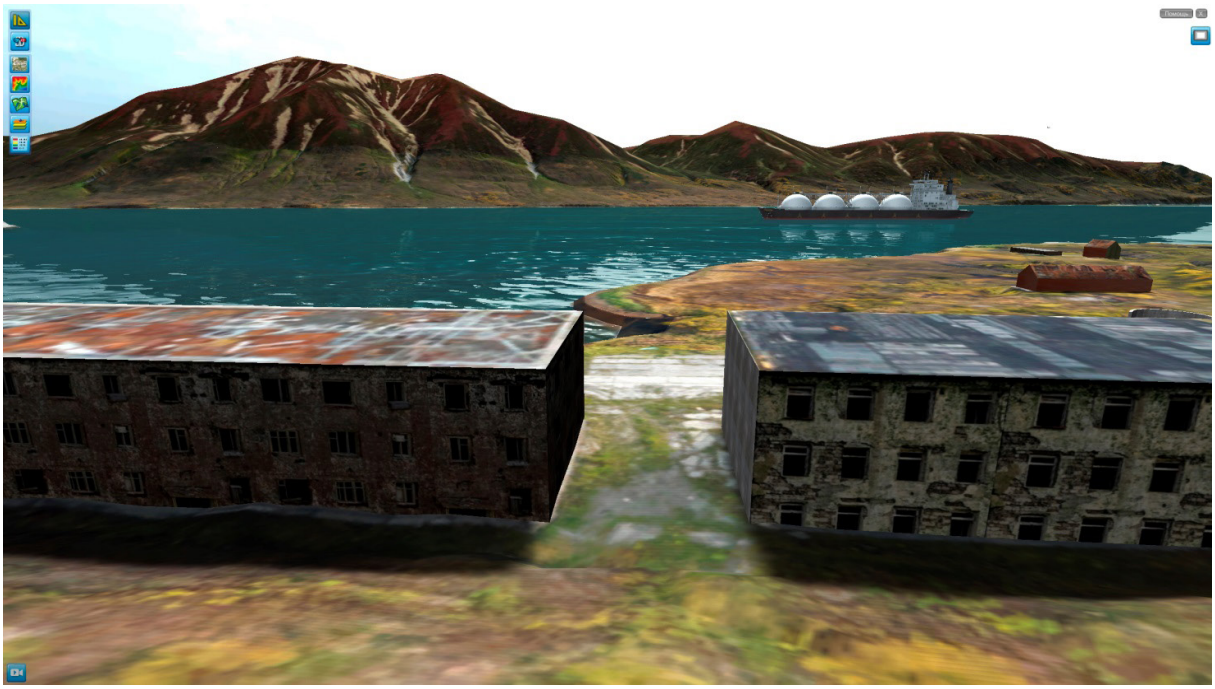

Рис. 3. Моделирование в реальных габаритах существующих сооружений и заходящих в порт судов-газовозов.
Fig. 3. Modeling of existing structures and gas carrier ships entering the port in real dimensions.

С целью повышения реализма в виртуальной среде были применены следующие решения:

– анимация и звуковое сопровождение волн;

− визуальное (световое) моделирование подводных эффектов при «погружении» камеры ниже уровня воды;

− моделирование неба и облаков

− моделирование дымки

Для облегчения навигации в модели была реализована интерактивная карта-врезка, обеспечивающая возможность масштабирования и смены охвата территории, а также быстрое перемещение камеры в указанную точку.

Для обеспечения непрерывного демонстрационного показа модель была снабжена фиксированным треком для облета камеры в режиме визуализации. При этом в любой момент облета возможен перехват управления пользователем и ручная навигация в модели.

По итогам обработки данных залета, были получены облака точек лазерного сканирования. Они были разделены на классы «Земля», «Растительность», «Сооружения», «Прочее». По данным точек класса «Земля» были созданы матрицы высот и триангуляционные поверхности, в дальнейшем они использовались для создания топографических планов 1:2 000 и 1:500 [*Gorgens* et al., 2017], а также для модели рельефа в среде UNITY.

Моделирование наземных сооружений производилось по данным лидарной съемки (определение габаритов и форм). Для этого точки из класса «Растительность» преобразовывались в регулярную модель данных (GRID) с шагом около 0,5 м, подгружались в программный продукт ArcView и оцифровывались по контуру сооружения. Используя ГИС-запросы к полученному гриду, определялась высота сооружения или ряд высот его характерных точек. Полученные векторные материалы через обменный формат DWG экспортировались в среду моделирования 3D MAX, где полученный контур трансформировался с использованием модификаторов Extrude (для «выдавливания» на ранее определенную высоту), Tesselate (рассечение граней на более мелкие сегменты с целью дальнейшей их визуально-ручной модификации для придания реализма). В случае сложных объектов применялось моделирование по частям с последующим «слиянием» 3D-объектов.

Для создания моделей рельефа уровней 1 и 2 использовались данные лазерного сканирования (точки класса «Земля»), по которым производилось создание TIN-поверхности по методу триангуляции Делоне и загружались в среду 3D MAX напрямую. Поверхности рельефа для уровня 3 создавались методом экструдирования из плоской сетки в среде 3D MAX с использованием модификатора Displace. В дальнейшем на участках стыковки моделей разной детальности производилась сводка узлов и вершин TIN-поверхностей (вручную) с последующим их слиянием в единые сегменты данных.

Моделирование рельефа также производилось с использованием процедур оптимизации количества граней и вершин TIN-поверхностей с использованием модификатора Optimize из набора инструментов 3D MAX. Данный модификатор позволяет управляемо генерализовать высокополигональную TIN-поверхность, устранив слишком длинные ребра (улучшает визуальное восприятие модели) и лишние грани на заведомо плоских участках.

Для текстурирования стен использовались трансформированные текстуры стен, полученные либо по данным наклонных съемок, либо по данным наземной фотосъемки. Для текстурирования рельефа использовались ортофотопланы либо иные растровые карты (см. ниже).

После текстурирования полученные объекты импортировались вместе с текстурами в среду UNITY через обменный формат OBJ.

Набор полученных пространственных слоев (ГИС-слоев) включал следующее:

– цифровая модель рельефа в матричной форме с шагом 1 м и высотной точностью около 20 см;

– растровая карта в виде цветного ортофотоплана 1:2 000 с детальностью 10 см;

– растровая карта в виде топопланов с полупрозрачной текстурой ортофотоплана;

– растровая карта в виде раскрашенной по высотам модели рельефа с нанесенными горизонталями и отметками высот.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

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. Приложение ориентировано на работу в среде Windows 7 и выше, поддержка работы на иных платформах (например, Apple или Android) в данный момент не реализована. Подобная «сборка» не требует инсталляции, и при запуске обеспечивает возможность выбора качества расчета 3D-сцен, разрешающей способности экрана и далее обеспечивает работу со всем набором данных в виде 3D-визуализации в режиме реального времени. Полученная в результате модель обладает следующими преимуществами:

– защищенность от копирования информации (несанкционированное использование информации напрямую невозможно, декомпиляция затруднена);

– простота интерфейса и необходимый минимум функций;
– небольшие размеры (до 2 Гб дискового пространства);
– нетребовательность к ресурсам компьютера (8 Гб оперативной памяти и процессор Intel Core i5 – вполне достаточно);
– очень хорошее качество (по отзывам пользователей) 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], топоплан 1:2 000–1:500).

Рис. 4. Виды слоев-текстур: слева – топографический план 1:2 000, в центре – ортофотоплан, справа – карта высот с нанесенными горизонталями
Fig. 4. Types of texture layers: on the left – topographic plan 1:2000, in the center – orthomosaic, on the right – elevation map with plotted contour lines

Матрица высот была использована для создания растрового изображения с цветовой шкалой высот с нанесением на нее автоматических слоев горизонталей и точечных отметок высот. Данные плановой аэрофотосъемки были использованы для создания ортофотопланов местности с детальностью 10 см (цветные). По полученным ортофотопланам и цифровым моделям рельефа были построены цифровые топографические планы.

При создании матрицы высот рельефа и поверхности рельефа для UNITY также использовались данные о батиметрии с топокарт 1:200 000, данные о рельефе из модели ALOS DEM 30. Все перечисленные 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). Это обеспечило непрерывность поверхности в созданной виртуальной среде (рис. 5).

Полученные слои данных (модель рельефа с текстурами видимых фотоснимков, гипсометрической картой, топографическими планами 1:1 000) были встроены в оболочку виртуальной среды в виде переключаемых наборов данных.

Отдельно были смоделированы (по классам точек лазерных отражений «Сооружения», наземным и перспективным снимкам, а также ортофотопланам) трехмерные модели объектов, оставшихся на территории до начала работ (жилые дома, складские

помещения, крупные емкости, причальные сооружения и прочее). Моделирование объектов велось в строгом соответствии с их размерами в облаках лазерных точек. Для моделирования и текстурирования использовался пакет 3D MAX, далее объекты вручную вставлялись в виртуальную модель и размещались на своих местах.

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

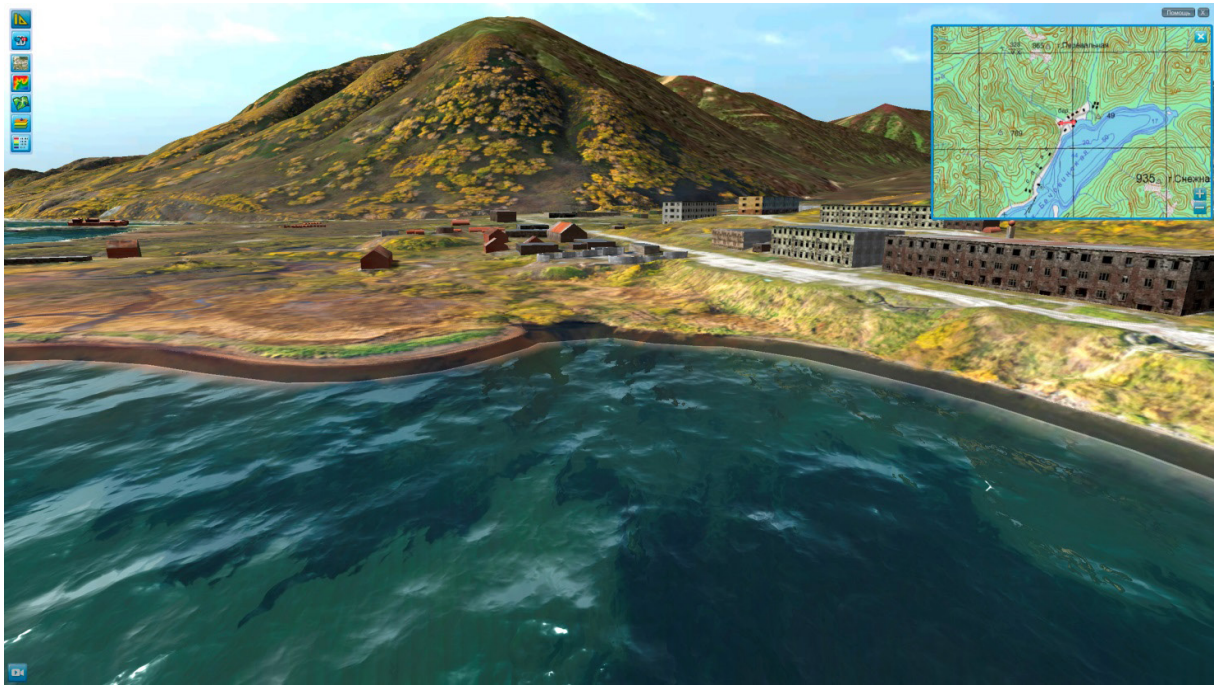

Рис. 5. Непрерывная поверхность наземного и подводного рельефа, полученная по данным разных источников
Fig. 5. Continuous surface of terrestrial and underwater relief obtained from various sources

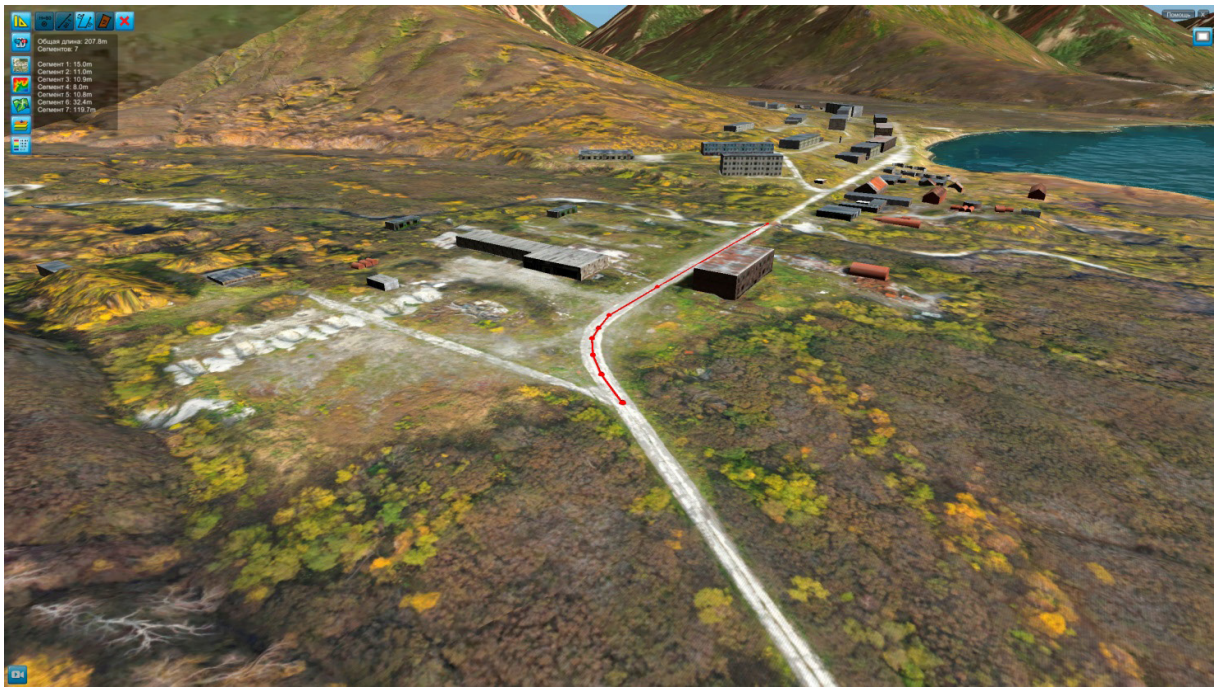

Рис. 6. Измерение длин и площадей в модели
Fig. 6. Measuring length and area of the polygon in model

Модель поддерживает комплекс измерений высот, длин, периметров, превышений, площадей (рис. 6) и обеспечивает возможность обращения к атрибутике векторных объектов, хранящихся в формате KML (текстовый формат Google Earth). Данный формат принят как основной обменный формат для векторных данных в силу его простоты и распространенности. Кроме того, формат является открытым и текстовым, что также облегчает задачу. 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.

Для моделирования рельефа дна акватории были использованы данные о глубинах с топографических карт 1:200 000 (лист N-57-XXVIII). Для достижения более выраженного визуального эффекта вертикальный масштаб глубин был принят как 1:3 (визуально глубины более выражены). Помимо сведений о глубинах, в модель были добавлены сведения об опасных объектах (корпус затонувшей у одного из причалов подводной лодки, рис. 7) с соблюдением их размеров и местоположения (сведения были получены по данным фотосъемки в видимом диапазоне благодаря высокой прозрачности воды).

Рис. 7. Моделирование опасных объектов под водой (корпус затопленной подводной лодки)
Fig. 7. Modeling dangerous objects under water (submerged submarine)

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).

Отдельно следует отметить, что в данной виртуальной среде обеспечена возможность работы в режиме 3D-анаглиф (стереовизуализация посредством цветных очков, см. рис. 8). Управление перемещением камеры (пользователя) возможно также с применением touch-экранов, либо в автоматическом режиме по заранее заданной траектории.

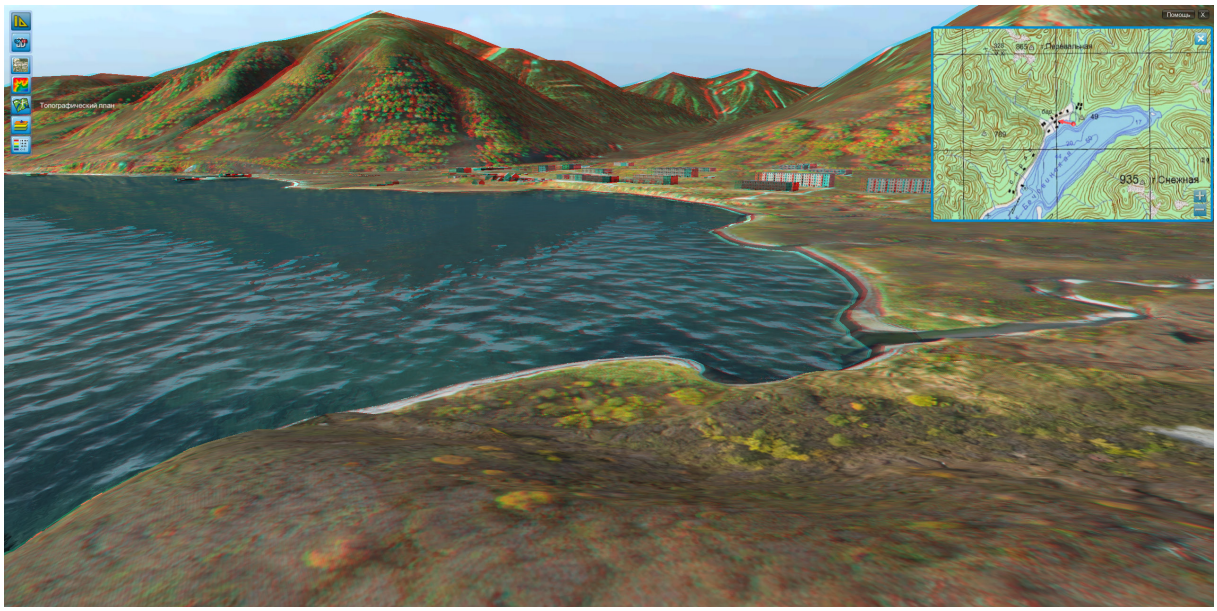

Рис. 8. Анаглифическая стереовизуализация
Fig. 8. Anagliphic stereovisualization

Преимущества описанного подхода. Основными достоинствами подобного подхода к созданию виртуальных сред и информационному обеспечению работ по проектированию портовых комплексов являются:

1. Возможность работы с высокоточными пространственными данными без использования сети Интернет;
2. Возможность установки виртуальной среды на любом количестве рабочих станций без дополнительных затрат;
3. Разумные и гибкие 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

У подобных моделей также есть ряд недостатков. Так, при необходимости расширить имеющиеся наборы данных (добавить иные растровые слои, 3D-объекты, увеличить или уменьшить пространственный охват модели) требуется полное перестроение (компиляция) EXE-приложения. Сам процесс перестроения достаточно сложен и требует специальных знаний (UNITY, навыки сегментации пространственных данных, прочее).

Модель имеет ряд требований в части аппаратного обеспечения – не менее 8 Гб оперативной памяти, процессор уровня Intel Core i5 или аналогичный (и выше), видеокарта с производительностью на уровне NVIDIA 900-й серии или лучше. Впрочем, такие требования в 2022 г можно расценивать как минимальные для современного ПК или ноутбука.

После тестовой эксплуатации данной модели (по результатам которой было внесено до 20 исправлений в инструментарий и способы отображения данных) у представителей компании-заказчика аэросъемочных работ были сделаны выводы о ее практической значимости. По итогам работы специалисты были полностью удовлетворены реализацией выбранных подходов (закрытость данных, простота, компактность, отсутствие необходимости инсталляции, дешевизна). Основные пожелания касались расширения круга используемых типов растровых слоев и возможности редактирования векторных данных без выхода из виртуальной среды. В настоящее время проводятся работы по наполнению виртуальной среды дополнительными слоями-картами:

– углов наклона;
– экспозиции склонов;

− относительных высот растительности;

− проходимости растительности;

Одним из сопутствующих предметов изучения в данной работе являлась оценка пределов габаритов территории, на которых данный подход к моделированию может быть реализован. При этом предполагается, что дальнейшая работа с подобными системами будет вестись на производительных, но тем не менее персональных (не специализированных) компьютерах. Опыт создания данной модели показал возможность обеспечения приемлемого уровня комфорта работы модели на персональных компьютерах с процессорами Intel Core i7 и 32 Гб оперативной памяти при площади территории до 2 400 км^2. Это позволяет говорить о возможности применения данного подхода не только на небольших участках, но и на целых регионах.

ВЫВОДЫ

По итогам проделанной работы можно констатировать, что описанная в работе концепция создания виртуальной модели с разными уровнями детальности (1:100 000 – 1:500) по данным как открытых источников, так и материалов воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки технически реализуема и может использоваться как ГИС-специалистами, так и обычными пользователями без какой-либо подготовки.

Полученная модель обеспечивает хорошее качество трехмерной визуализации, работу с ГИС-слоями модели или пользовательскими векторными слоями данных, метричность. Модель обладает высокой пространственной точностью и невысокими аппаратно-техническими требованиями. Модель защищена от несанкционированного копирования данных.

Использование таких виртуальных моделей в ходе проектно-изыскательских работ компаниями на всех уровнях ведения деятельности (от высшего управленческого звена до непосредственных работников на месторождении) весьма эффективно. Данный подход фактически популяризирует ГИС-подходы к работе с геоданными и является простым и результативны способом информационного обеспечения проектов, способствующим геоколлаборации его участников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / 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. 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. *Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L.* A Method for Optimizing Height Threshold when Computing Airborne Laser Scanning Metrics. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017. V. 83. No. 5. P. 343–350. DOI: 10.14358/PERS.83.5.343.

4. *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.

5. *Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2008. V. 112. No. 10. P. 3891–3897. DOI: 10.1016/J.RSE.2008.06.007.

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

7. *Mukul M., Mukul M., Srivastava V., Jade S.* Uncertainties in the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula, 2017. Sci Rep 7. https://doi.org/10.1038/srep41672

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. 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. Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing, 2001. P. 935–938, 2001. DOI: 10.1109/ICIP.2001.958278.