

УДК: 912.4

Т. В. Сукманова<sup>1</sup>, Н. С. Белов<sup>2</sup>

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-3-31-595-610

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SLAM-СКАНИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ТРЕХМЕРНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ И АНАЛИЗА ОБЪЕКТОВ ПРИРОДНОГО И КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

### АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются возможности применения технологии SLAM-сканирования (Simultaneous Localization and Mapping) для охраны и мониторинга природного и культурного наследия. Исследование основано на использовании мобильного 3D-лидарного сканера LiGrip H300, который обеспечивает высокоточное создание пространственных моделей объектов с точностью до  $\pm 1$  см и скоростью сбора данных до 640 000 точек в сек. Полевые исследования проведены на двух ключевых объектах: экологической тропе «Королевский бор» в национальном парке «Куршская коса» (Калининградская обл.) и мемориальном комплексе «Командный пункт 43-й армии» в пос. Холмогоровка. Авторами выявлены существенные преимущества SLAM-технологий перед традиционными методами съемки, такими как тахеометрическая съемка. Применение SLAM позволило значительно сократить временные затраты — среднее время обработки одного объекта составило 1,5 ч против нескольких дней при традиционных методах. Повышение детализации получаемых данных также является значительным преимуществом данной технологии. На основе собранных данных разработаны цифровые модели рельефа и местности с абсолютной точностью 3–5 см, а также ортофотопланы с разрешением 20 мм/пикс. Особое внимание уделено вопросам интеграции облаков точек в геоинформационные системы (ГИС). Выявлены ограничения стандартных ГИС-инструментов при работе с высокоплотными пространственными данными, что потребовало адаптации существующих программных решений. Предложены пути совершенствования программного обеспечения для эффективной обработки больших массивов лазерных данных непосредственно в ГИС-среде. Результаты исследования демонстрируют перспективность применения SLAM-технологий не только для мониторинга динамических процессов в природных комплексах, но и для планирования реставрационных работ на объектах культурно-исторического наследия региона. Использование SLAM позволяет повысить оперативность и точность сбора данных, что особенно важно для территорий с ограниченным доступом или сложными условиями съемки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** SLAM-сканирование, природное наследие, культурное наследие, Калининградская область, охрана наследия

<sup>1</sup> Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Высшая школа живых систем, ул. Университетская, д. 2, Калининград, Россия, 236041, *e-mail*: [tanja.sukmanova@yandex.ru](mailto:tanja.sukmanova@yandex.ru)

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Высшая школа живых систем, ул. Университетская, д. 2, Калининград, Россия, 236041, *e-mail*: [belovns@gmail.com](mailto:belovns@gmail.com)

Tatiana V. Sukmanova<sup>1</sup>, Nikolay S. Belov<sup>2</sup>

## USE OF SLAM-SCANNING IN THE TASKS OF THREE-DIMENSIONAL DOCUMENTATION AND ANALYSIS OF NATURAL AND CULTURAL HERITAGE OBJECTS

### ABSTRACT

The article examines the possibilities of applying SLAM scanning technology (Simultaneous Localization and Mapping) for the protection and monitoring of natural and cultural heritage. The study is based on the use of the mobile 3D LiDAR scanner LiGrip H300, which enables the creation of highly accurate spatial models of objects with a precision of  $\pm 1$  cm and a data collection speed of up to 640 000 points per second. Field research was conducted on two key sites: the ecological trail “Korolevsky Bor” in the Curonian Spit National Park (Kaliningrad Region) and the memorial complex “Command Post of the 43rd Army” in the village of Kholmogorovka. The authors identified significant advantages of SLAM technologies over traditional surveying methods, such as tacheometric surveying. The application of SLAM significantly reduced time expenditures — the average processing time for one object was 1.5 h compared to several days using traditional methods. Increased data detail is another major advantage of this technology. Based on the collected data, digital terrain and relief models were developed with an absolute accuracy of 3–5 cm, along with orthophoto plans with a resolution of 20 mm/pixel. Special attention was paid to integrating point clouds into geographic information systems (GIS). Limitations of standard GIS tools when working with high-density spatial data were identified, necessitating the adaptation of existing software solutions. Approaches for improving software to efficiently process large volumes of laser data directly within the GIS environment were proposed. The study results demonstrate the promise of SLAM technologies not only for monitoring dynamic processes in natural complexes but also for planning restoration work on regional cultural and historical heritage sites. The use of SLAM enhances the speed and accuracy of data collection, which is particularly important for areas with limited access or challenging survey conditions.

**KEYWORDS:** SLAM-scanning, natural heritage, cultural heritage, Kaliningrad Region, heritage protection

### ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии пространственной съемки играют ключевую роль в охране и управлении природным и культурным наследием, обеспечивая эффективные методы анализа и мониторинга. Одним из самых передовых инструментов в этой области является SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), который позволяет одновременно определять местоположение сканирующего устройства и создавать карты окружающей среды. Это особенно полезно в условиях сложного рельефа или затененных зонах, где традиционные методы картографирования могут оказаться неэффективными.

Использование SLAM-сканирования в сочетании с мобильными 3D-лидарными системами предоставляет множество преимуществ, особенно в природоохранной сфере, где важно не только создать точные пространственные модели территорий, но и оперативно реагировать на изменения, происходящие в экосистемах. Мобильные 3D-сканеры

---

<sup>1</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Living Systems, 2, Universitetskaya str., Kaliningrad, 236041, Russia, *e-mail*: [tanja.sukmanova@yandex.ru](mailto:tanja.sukmanova@yandex.ru)

<sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Living Systems, 2, Universitetskaya str., Kaliningrad, 236041, Russia, *e-mail*: [belovns@gmail.com](mailto:belovns@gmail.com)

используют лазерные технологии для захвата высокодетализированных данных о поверхности земли и растительности, что делает их незаменимым инструментом для мониторинга изменений на протяжении времени. Высокая степень точности и детализации помогает специалистам в области охраны окружающей среды в анализе влияния различных факторов, таких как климатические изменения, антропогенное воздействие и природные катастрофы.

Применение SLAM-технологий позволяет существенно сократить временные и финансовые затраты на проведение съемки за счет автоматизации процесса сборки данных и минимизации необходимости ручных манипуляций. Полученные данные легко интегрируются с системами геоинформационных технологий, что обеспечивает более глубокий анализ и визуализацию информации. Эта интеграция помогает формировать наглядные отчеты, позволяя заинтересованным сторонам, включая государственные и частные организации, принимать более обоснованные решения в области охраны окружающей среды.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Описание территории исследования

Калининградская область характеризуется уникальным природным и культурно-историческим наследием, которое напрямую связано с географическим положением и историей региона. В целях сохранения особо важных объектов реализуется комплекс федеральных и региональных мер, направленных на охрану экосистем, объектов архитектурного наследия и культурных традиций.

Природное наследие Калининградской обл. включает разнообразные ландшафтные зоны, такие как побережье Балтийского моря, Куршская и Вислинская косы, лесные массивы, болотные экосистемы, отдельные природные объекты и т. д. В целях их защиты на территории региона созданы особо охраняемые природные территории, например, национальный парк «Куршская коса» — объект Всемирного наследия ЮНЕСКО, характеризующийся уникальной природной средой, включающей подвижные песчаные дюны, редкие виды растений и животных. На территории косы также организованы рекреационные зоны и экологические тропы. Существенное значение для сохранения биоразнообразия имеет недавно образованный национальный парк «Виштынецкий», являющийся ареалом редких и исчезающих видов, включая западную европейскую норку (*Mustela lutreola cylipea*) и черного аиста (*Ciconia nigra*). Одним из приоритетных направлений природоохранной деятельности в Калининградской обл. являются берегозащитные и береговосстановительные мероприятия на побережье Балтийского моря, направленные на предотвращение абразии, укрепление береговой линии, сохранение природных и природно-исторических ландшафтов и минимизацию негативного воздействия природно-антропогенных факторов. В рамках данных мероприятий осуществляются инженерно-технические работы, включая возведение искусственных гидротехнических сооружений, восстановление песчаных пляжей, стабилизацию дюнных систем и биотехнические меры по укреплению растительного покрова.

Культурно-историческое наследие региона включает широкий спектр объектов, отражающих различные этапы ее исторического развития, начиная с периода существования Тевтонского ордена и заканчивая современным этапом. Среди ключевых архитектурных восстановленных памятников выделяется Кафедральный собор в Калининграде, являющийся знаковым объектом культурного наследия, в стенах которого находится могила Иммануила Канта. Значительный туристический интерес представляют средневековые замки Тевтонского ордена, включая Инстербург, Шаакен и Вальдау, нуждающиеся в проведении комплексных реставрационных мероприятий. Кроме того, важную роль в сохранении культурного наследия играют элементы фортификационной системы Кёнигс-

берга, такие как бастионы, форты и городские ворота, многие из которых в настоящее время функционируют в качестве музейных комплексов, являются объектами туристической инфраструктуры (отели, рестораны и т. д.). Дополнительно сохранение и изучение материального наследия региона осуществляется на базе Музея янтаря и Музея Мирового океана.

С целью верификации и апробации функциональных возможностей SLAM-сканирования, в качестве ключевых тестовых полигонов были избраны локации, представляющие значительный научный и практический интерес в пределах области. Объектами исследования были определены экологическая тропа «Королевский бор», расположенная в границах национального парка «Куршская коса», и объект культурного наследия федерального значения — Командный пункт 43-й Гвардейской армии в пос. Холмогоровка. Обоснование выбора данных территорий продиктовано их специфическими характеристиками: выраженной антропогенной нагрузкой на природные комплексы Куршской косы, обусловленной интенсивным туристическим потоком вдоль экологических маршрутов национального парка, а также актуальностью исследуемой инфраструктуры Командного пункта в контексте реализуемых проектов по его реставрации и функциональному перепрофилированию на федеральном и региональном уровнях. Куршская коса (рис. 1) представляет собой крупнейший аккумулятивный морской барьер в акватории Балтийского моря, имеющий общую протяженность порядка 98 км; при этом 49 км расположены на территории Российской Федерации, где он функционально разделяет акватории Куршского залива и Балтийского моря. Его поперечные размеры в пределах между моренными ядрами в районе пос. Рыбачий и г. Нида (Литва) варьируются в диапазоне от 0,4 до 5,4 км. В литологическом отношении структура косы представлена преимущественно псаммитовыми и реже псаммито-псефитовыми фациями, которые подстилаются плейстоценовыми гляциальными или лимно-дельтаозерными суглинками, залегающими ниже уровня Мирового океана. Поверхность барьера маркируется активным развитием эоловых форм рельефа, включая современные аккумулятивные тела — авандюны и фронтальные дюны вдоль морского берега, а также импозантную голоценовую дюнную грядку, достигающую высоты 68 м, ориентированную параллельно побережью залива. Данная аккумулятивная форма подвержена процессам абразии в зонах непосредственного контакта с акваторией залива и испытывает интенсивное воздействие волновой динамики со стороны как открытой Балтики, так и Куршского залива. В контексте активных экзогенных процессов применение геоинформационных систем (ГИС) приобретает статус основного инструмента для анализа пространственной организации территории, прогностического моделирования морфодинамических изменений и формирования эффективных стратегий рационального природопользования [Бадюкова и др., 2009].

В пределах национального парка «Куршская коса» функционирует экологическая тропа «Королевский бор», которая представляет собой научно-познавательный маршрут ориентировочной протяженностью 3 км. Данный маршрут призван продемонстрировать специфику прибрежных лесных формаций, развивающихся в условиях аккумулятивных дюнных ландшафтов. Пространственная структура растительного покрова вдоль маршрута характеризуется выраженным разнообразием фитоценологических комплексов (рис. 2). Их генезис определяется сложным взаимодействием сукцессионных процессов, свойственных песчаным субстратам, и локальных эдафических и климатических факторов. Так, наряду с автохтонными лесными экосистемами, включающими комплексы сосняков и смешанных насаждений, выявлено присутствие аллохтонных видов, в частности насаждений туи складчатой (*Thuja plicata*), изучение которых представляет существенный интерес в контексте анализа инвазионных процессов [Губарева, 2017]. Функциональное значение данного объекта определяется его ролью в сохранении регионального биоразнообразия,

поскольку он выступает в качестве рефугиума для широкого спектра видов флоры и фауны, характерных для приморских экосистем. Кроме того, тропа обладает значительным научно-образовательным потенциалом, предоставляя платформу для проведения мониторинговых исследований состояния лесных экосистем, анализа факторов антропогенного давления и апробации современных методов пространственного анализа, например с использованием геоинформационных систем [Калашикова, 2021]. Наличие специализированной инфраструктуры, включающей информационные стенды и интерактивные модули, способствует повышению уровня экологической грамотности посетителей.



*Рис. 1. Вид на прикорневую часть Куршской косы (русская часть) (фото автора)  
Fig. 1. View of the root part of the Curonian Spit (Russian part) (photo by the author)*



*Рис. 2. Экологическая тропа «Королевский бор»  
Fig. 2. Ecological trail “Korolevsky boron”*

Калининградская область, расположенная на территории исторического региона Восточная Пруссия, обладает уникальным и богатым культурно-историческим наследием, актуализирующим необходимость применения современных методологий исследования и консервации. В контексте мероприятий по комплексной реконструкции мемориального комплекса «Командный пункт 43-й армии» в пос. Холмогоровка (рис. 3), являющегося объектом культурного наследия федерального значения [Воробьева, 2021], ключевым инструментом пространственного документирования и моделирования выступают технологии SLAM-сканирования. Данный подход обеспечивает оперативное создание высокоточных трехмерных цифровых репрезентаций объекта. Интеграция полученных геопространственных данных в среду геоинформационных систем (ГИС) позволяет осуществить не только прецизионную фиксацию актуального состояния объекта культурного наследия, но и сформировать его детализированный цифровой двойник. Этот цифровой актив необходим для эффективного мониторинга и администрирования хода реставрационных мероприятий. Синергия SLAM-технологий и ГИС-инструментария способствует успешному решению сложных задач пространственного анализа в процессе преобразования объекта под функционал современного учебно-методического центра «Авангард». Исключительная точность данных лазерного сканирования играет критическую роль в процессе аутентичного воссоздания утраченных элементов архитектурного облика, таких как восточный портик, декорированный ионическими колоннами и историческая трехмаршевая лестница. Особая значимость данного проекта в год 80-летия победы в Великой Отечественной войне определяется его вкладом в сохранение исторической памяти о событиях 1945 г. посредством интеграции новейших технологических решений с материальным историческим наследием в единое цифровое информационное пространство.



*Рис. 3. Мемориальный комплекс «Командный пункт 43-й армии и временный пункт управления 3-м Белорусским Фронтом»*  
*Fig. 3. Memorial Complex “Command Post of the 43rd Army and Temporary Command Post of the 3rd Belorussian Front”*

## Материалы и методы

В настоящем исследовании были задействованы передовые технологии и методики пространственной съемки, ориентированные на обеспечение охраны и рационального управления природным и культурным наследием [Barba et al., 2021; Paris, Rossi, 2024; Sano et al., 2024]. Ключевым инструментарием исследования явились мобильные трехмерные лидарные системы, функционирующие на основе алгоритма одновременной локализации и построения карты (SLAM), в частности модель LiGrip H300 (рис. 4), характеристики которой приведены в табл. 1.



Рис. 4. Лазерный сканер LiGrip H300 (фото автора)  
 Fig. 4. LiGrip H300 laser scanner (photo by the author)

Табл. 1. Описание сканера LiGrip H300  
 Table 1. LiGrip H300 scanner description

Характеристика	Значение / Диапазон
Метод сканирования	SLAM, PPK-SLAM, RTK-SLAM
Скорость сканирования	До 640 000 pts/s (точек в сек.)
Дальность сканирования	До 300 м
Точность сканирования	До $\pm 1$ см (лазерная точность)
Абсолютная точность	$\leq 5$ см
Поле зрения (FOV) LiDAR	$280^\circ$ (вертикальное) $\times$ $360^\circ$ (горизонтал.)
Камера	INSTA ONE RS 1-inch Panoramic Camera
Разрешение фото	6 528 $\times$ 3 264
Разрешение видео	6 144 $\times$ 3 072
Размер CMOS сенсора	1 дюйм
GNSS система (опц. RTK)	GPS + BDS + Glonass + Galileo + QZSS
Точность RTK	1 cm + 1 ppm
Внутренняя память	512 GB
Время непрерывного сканирования	До 55 мин
Время работы от одной батареи	3 ч
Вес (сканер с камерой)	$\sim 1.60$ – $1.67$ кг
Защита IP	IP54
Рабочая температура	От $-30$ до $60$ $^\circ\text{C}$
Поддерживаемые платформы	Ручной, рюкзак, автомобиль, дрон
Формат данных облака точек	LAS, LiData
Интерфейсы	USB, Ethernet

Данная технология обеспечивает одновременное определение геопозиции сканирующего устройства и формирование высокодетализированных пространственных моделей окружающей среды, что представляет особую ценность при исследованиях в условиях сложного рельефа и зон ограниченной освещенности. Процесс сбора данных осуществлялся посредством высокоточных лазерных сканирующих систем, предназначенных для фиксации облаков точек, отражающих как земную поверхность, так и растительный покров. Следует подчеркнуть, что мобильность лидарной системы позволяла проводить съемку с варьируемой скоростью перемещения, обеспечивая оперативный охват обширных территорий. Высокая степень пространственного разрешения получаемых данных являлась критически значимой для прецизионной фиксации изменений, происходящих в исследуемых экосистемах. Обработка полученных данных осуществлялась с применением специализированного программного обеспечения, интегрированного с геоинформационными системами (ГИС), включая QGIS. Данное программное обеспечение поддерживало не только визуализацию и архивирование данных, но и проведение углубленного пространственного анализа, что является неотъемлемым аспектом мониторинга динамики природных и культурных объектов. ГИС-технологии применялись для оценки воздействия климатических флуктуаций и антропогенного фактора на экосистемы, а также для разработки научно обоснованных рекомендаций по их сохранению и реставрации.

При выполнении геодезических работ на объекте «Штаб 43 Армии» для обеспечения высокой точности позиционирования и калибровки SLAM-системы была развернута сеть из четырех контрольных точек (КТ). Их пространственное распределение соответствовало принципам оптимальной конфигурации, формируя трапециевидную структуру. Такое расположение КТ критически важно для предотвращения деформации траектории сканирования и минимизации геометрических искажений в результирующем облаке точек, таких как «ласточкины хвосты» или задвоения, которые могут возникать при линейном размещении опорных элементов. Сами контрольные точки снимались ГНСС-приемником Tersus в режиме RTK, подключение осуществлялось к университетской базовой станции Topcon.

На объекте «Королевский бор» сбор пространственных данных осуществлялся с использованием технологии постобработки кинематических данных (РПК). Базовая станция, размещенная на пункте с априорно известными координатами, обеспечивала сбор статических GNSS-наблюдений. Перемещаемый мобильный сканирующий комплекс, интегрированный с GNSS-приемником и закрепленный на носителе, регистрировал динамические наблюдения. Для обеспечения требуемой точности РПК-обработки продолжительность записи сырых GNSS-данных на базовой станции превышала интервал полевых работ, включая 20 мин до начала и 15 мин после завершения съемки.

Различия в применяемых методах геодезического обеспечения обусловили вариативность точностных характеристик полученных данных. В частности, использование РПК-технологии в условиях залесенной местности продемонстрировало повышенную точность по сравнению с результатами, полученными на открытой местности, что обусловлено спецификой распространения GNSS-сигналов и принципами постобработки.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Важным аспектом данного исследования явилось изучение потенциала интеграции пространственных данных, полученных посредством мобильного лазерного сканирования (SLAM), в структуру геоинформационной среды. Ключевая сложность проистекает из специфики формата исходных данных, генерируемых указанными сенсорными системами, который представлен в виде плотного облака точек. К сожалению, существующий на текущий момент функционал геоинформационных систем не обладает полноценными

возможностями для непосредственной и всесторонней обработки и аналитического использования данной структуры пространственных данных в рамках их стандартных инструментов.

Формат высокоплотного облака точек по своей природе подразумевает сбор и хранение экстремально большого объема измерений, исчисляющегося десятками и сотнями миллионов дискретных пространственных фиксаций. Обработка таких массивов данных представляет собой нетривиальную вычислительную задачу, и на текущем этапе развития далеко не каждая геоинформационная платформа способна обеспечить их эффективное и корректное функционирование в полном объеме. Данная особенность формата накладывает существенные ограничения на возможности его повсеместного и беспрепятственного использования в стандартных рабочих процессах геопространственного анализа без применения специализированных программных решений или расширений.

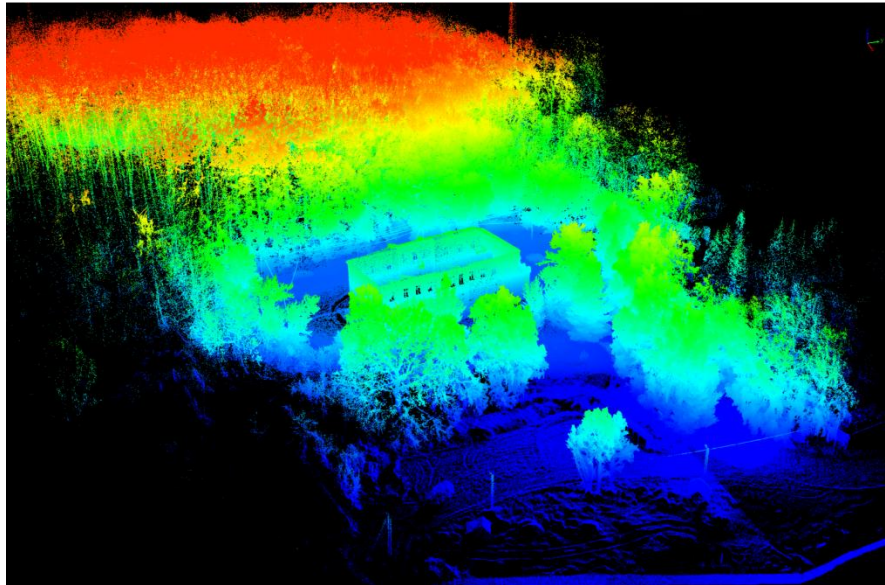
В результате сканирования экологической тропы «Королевский бор» (протяженность ~1 км) было получено облако точек объемом порядка 224 млн точек, а для мемориального комплекса «Командный пункт 43-й армии» — 316 млн точек, что свидетельствует о высокой плотности охвата. Полевые работы по сканированию одного объекта заняли в среднем 1,5 ч, что, по предварительным оценкам, на порядок быстрее по сравнению с традиционными тахеометрическими методами съемки для сопоставимой детализации и более чем в 5 р. быстрее, чем фотограмметрия (с учетом обработки материала).

В рамках программного комплекса QGIS реализован интегрированный инструмент для работы с облаками точек. Однако следует констатировать, что его функциональность на данном этапе развития находится преимущественно на базовом уровне. Основное предназначение встроенных средств QGIS сводится к первичной визуализации облака точек и выполнению ограниченного набора элементарных геометрических операций. Это означает, что, несмотря на возможность загрузки и отображения данных, их полноценный комплексный анализ и извлечение всей потенциально содержащейся информации с использованием только стандартного функционала QGIS является затруднительным или невозможным.

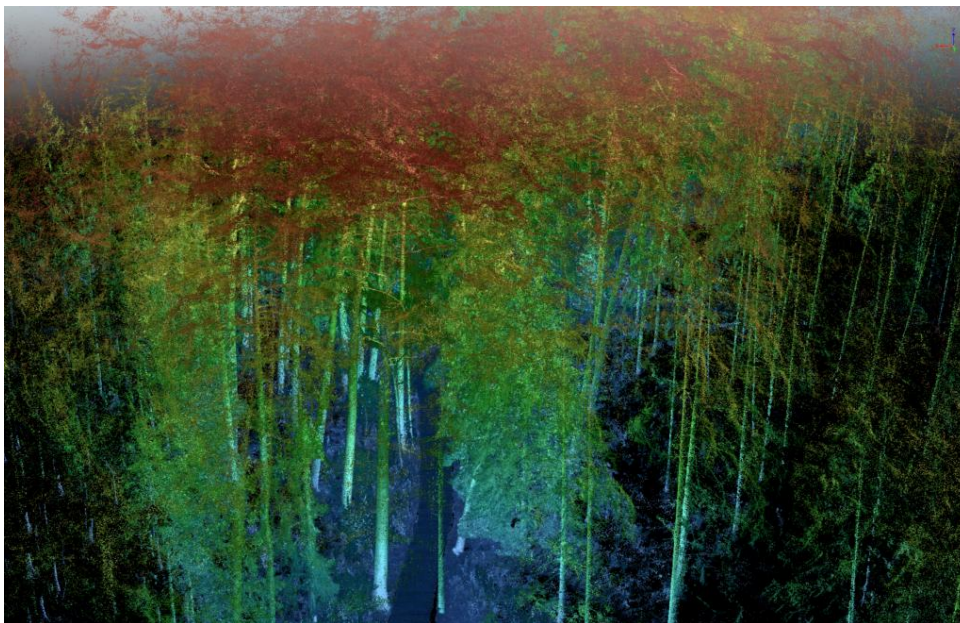
В то же время формат облака точек сам по себе является исключительно информационно насыщенным и обладает значительной семантической нагрузкой, предоставляя детальное описание пространственной структуры исследуемых объектов. Полученные в ходе полевых работ эмпирические данные для выбранных нами объектов исследования (как культурного, так и природного наследия) были успешно представлены в данном формате, и их графическая репрезентация, демонстрирующая высокую плотность и детализацию измерений, приведена на следующих рисунках (рис. 5–6), что подтверждает возможность эффективного сбора таких данных для задач мониторинга и анализа.

Последующим этапом исследовательского процесса стало методическое рассмотрение конкретных способов интеграции данных, представленных в формате облака точек, непосредственно в геоинформационную среду. Акцент делался на разработке и апробации рабочего процесса, позволяющего эффективно использовать высокодетализированные трехмерные данные, полученные методом лазерного сканирования, в стандартных геоинформационных системах для целей анализа и управления пространственной информацией. Целью являлось выявление оптимальных путей преобразования и представления этих сложных данных для их полноценного задействования в геопространственных задачах.

В ходе реализации данного этапа из исходного набора данных — собственно, необработанного облака точек, являющегося первичным продуктом сканирования — был получен ряд производных геопространственных продуктов. Одним из ключевых процессов стала классификация данных лазерного сканирования, направленная на сегментацию точек по их принадлежности к различным объектам и поверхностям.



*Рис. 5. Мемориальный комплекс «Командный пункт 43-й армии и временный пункт управления 3-м Белорусским Фронтом»*  
*Fig. 5. The memorial complex “Command Post of the 43rd Army and the temporary command post of the 3rd Belorussian Front”*



*Рис. 6. Элемент тропы «Королевский бор» Национального парка «Куршская коса»*  
*Fig. 6. Element of the trail “Royal Borough” of the Curonian Spit National Park*

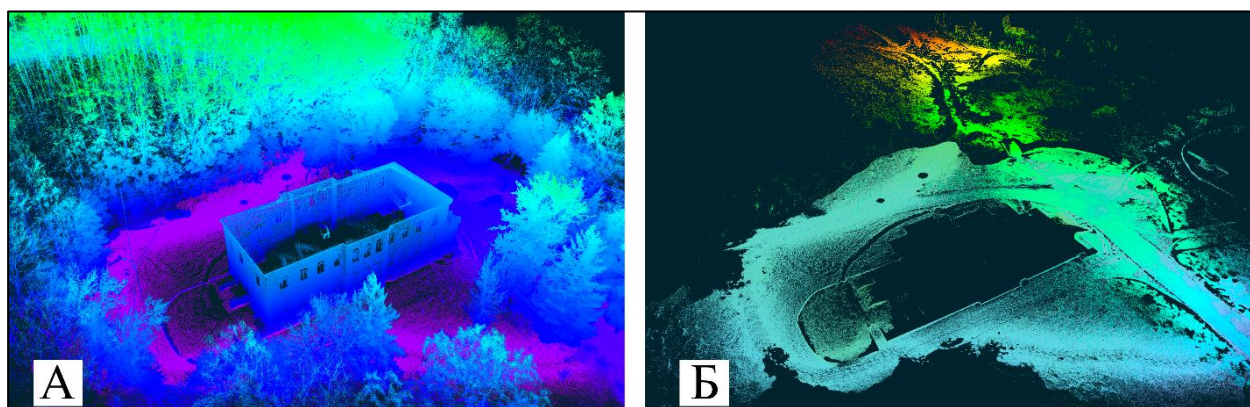
Процесс сегментации и классификации плотных облаков точек, полученных в результате геопространственной съемки, осуществлялся с применением специализированного программного обеспечения. Первоначально были предприняты попытки использования Agisoft Metashape. Однако несмотря на наличие функционала ручной классификации и поддержку данных наземного лазерного сканирования (НЛС) и воздушного лазерного сканирования (ВЛС) в последних версиях, его применимость оказалась ограниченной. Это

объясняется преимущественно фотограмметрической ориентацией инструментария данной программы. CloudCompare был задействован в ограниченном объеме. Основным сдерживающим фактором явилась необходимость ручного формирования классификационных правил с использованием модуля Саuro, что значительно увеличивало трудозатраты.

В конечном итоге основная классификация была реализована в Lidar360 с привлечением интегрированного модуля, функционирующего на принципах машинного обучения. Для обоих исследуемых объектов в качестве базового пресета был выбран «Forest», что обусловлено доминирующим присутствием растительности на данных территориях. Дополнительная классификация, в частности, выделение рельефа местности, выполнялась в 3D Survey. Здесь использовался встроенный классификатор рельефа со следующими параметрами: шаг высоты местности установлен на 0,05 м; шаг уклона местности варьировался от 15 до 20°, подбираясь индивидуально для каждого объекта; минимальная высота составляла 0,1 м; размер ячейки цифровой модели местности (ЦММ) — 0,3 м; коэффициент сглаживания, определенный как оптимальный для рассматриваемых объектов, равнялся 2; максимальное сглаживаемое расстояние, также признанное оптимальным, составило 0,05 м (рис. 7–8).

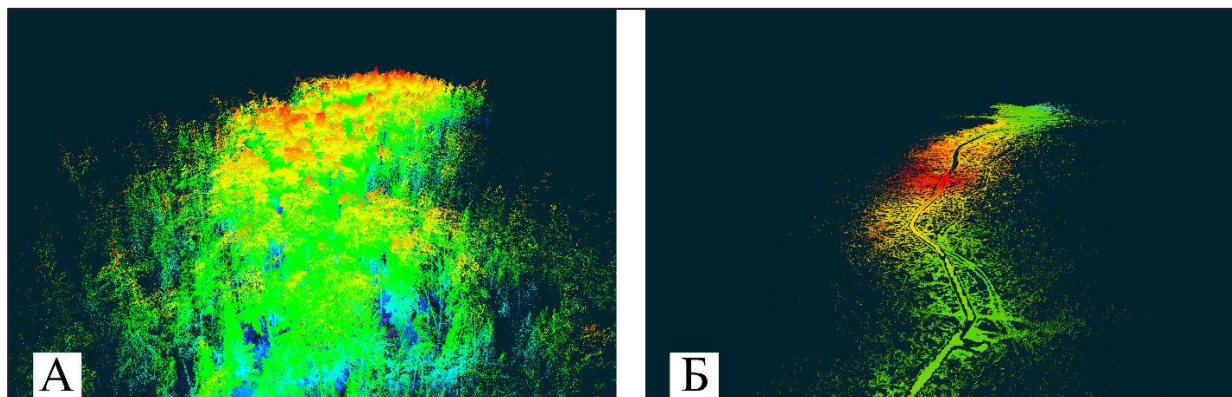
Эта процедура позволила выделить точки, соответствующие земной поверхности, что стало основой для дальнейшего формирования цифровой модели рельефа (ЦМР) (рис. 9). Одновременно с этим или в результате более широкой классификации были получены данные, пригодные для построения цифровой модели местности (ЦММ), включающей помимо рельефа также и надземные объекты (рис. 10).

Анализ сопоставления полученной модели с координатами контрольных точек, определенными с использованием ГНСС-приемника, показал достижение абсолютной точности на уровне 5 см для объекта культурного наследия и 3 см — для объекта природного наследия. Указанные значения соответствуют требованиям, установленным ГОСТ Р 56905-2016 «Проведение обмерных и инженерно-геодезических работ на объектах культурного наследия» для выполнения обмерных чертежей архитектурных объектов, а также превосходят нормативы точности, регламентированные методическими рекомендациями по проведению государственной инвентаризации лесов<sup>1</sup>.



*Рис. 7. Классификация точек рельефа «Штаб 43 Армии»  
(А — до классификации, Б — после классификации)  
Fig 7. Classification of relief points “43rd Army Headquarters”  
(A — before classification, B — after classification)*

<sup>1</sup> Приказ Минприроды России № 686 от 27.09.2021 «Об утверждении Порядка проведения государственной инвентаризаций лесов»



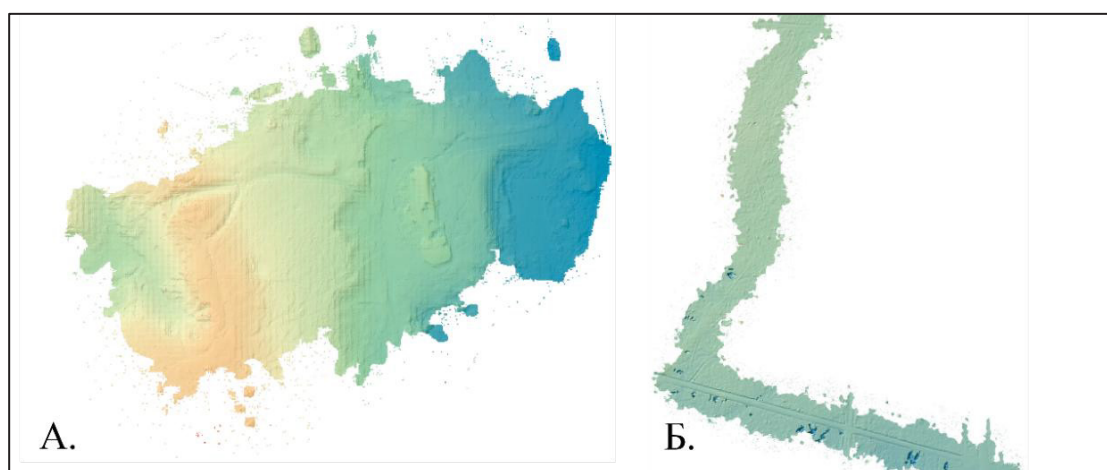
*Рис. 8. Классификация точек рельефа Элемент тропы «Королевский бор» Национального парка «Куришская коса»*

*(А — до классификации, Б — после классификации)*

*Fig. 8. Classification of relief points Element of the trail “Royal Borough” of the National Park “Curonian Spit” (A — before classification, B — after classification)*

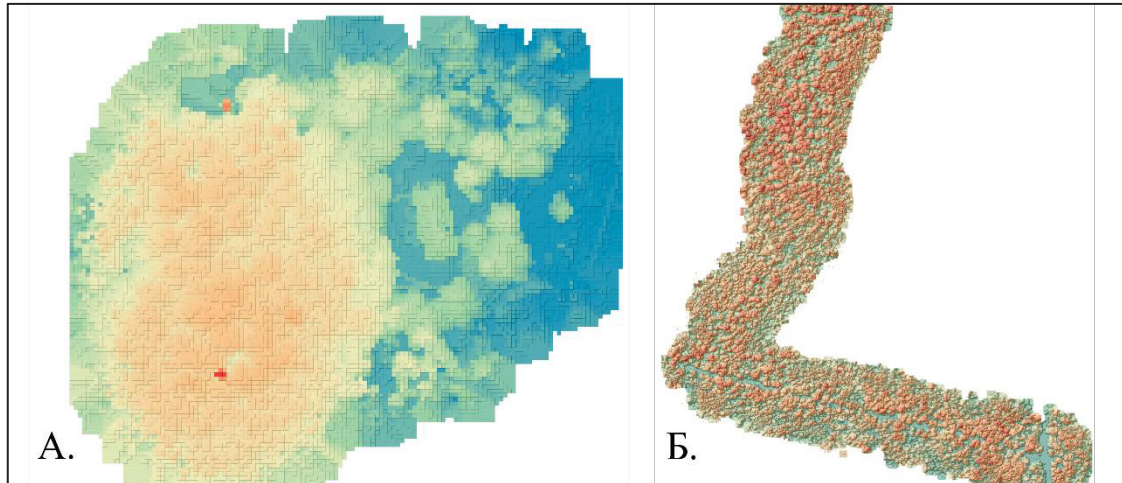
Существующие SLAM-системы, несмотря на их способность генерировать плотные облака точек, сталкиваются с существенным ограничением в контексте создания высококачественных MESH-моделей архитектурных объектов, особенно тех, что обладают относительно малыми геометрическими формами. Недостаточная детализация облаков точек, наглядно демонстрируемая на рис. 11, препятствует адекватному воспроизведению сложной морфологии таких объектов.

Данное ограничение стимулирует производителей SLAM-сканирующих систем к поиску инновационных решений. Осознавая значимость сохранения историко-культурного наследия, ведущие разработчики активно внедряют новую технологию — гауссов сплеттинг (Gaussian Splatting). Ожидается, что интеграция этой методики позволит существенно повысить фотореалистичность и геометрическую точность генерируемых 3D-моделей, тем самым расширяя области применения SLAM-технологий в архитектурном наследии и других сферах, требующих точного моделирования.

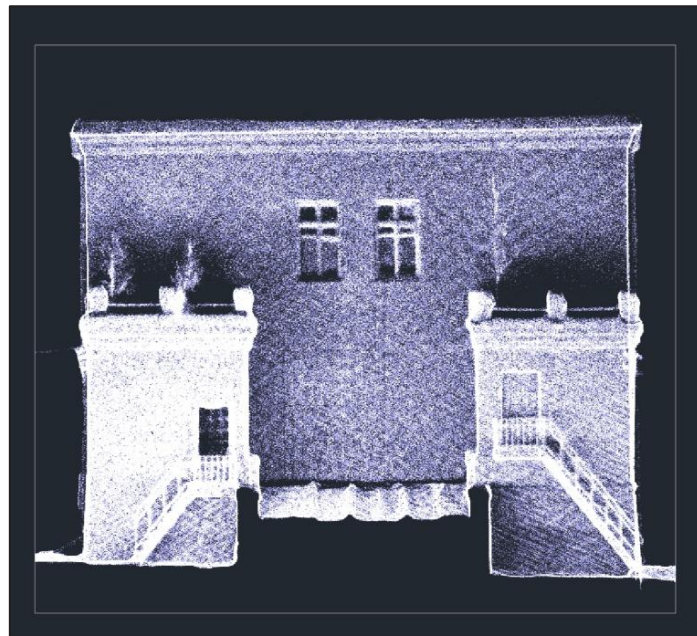


*Рис. 9. Цифровая модель рельефа в среде QGIS (А — «Штаб 43 Армии»,*

*Б — элемент тропы «Королевский бор» Национального парка «Куришская коса»)*  
*Fig. 9. Digital elevation model in QGIS environment (A — “43rd Army Headquarters”,*  
*B — element of the trail “Korolevsky Bor” of the National Park “Curonian Spit”)*



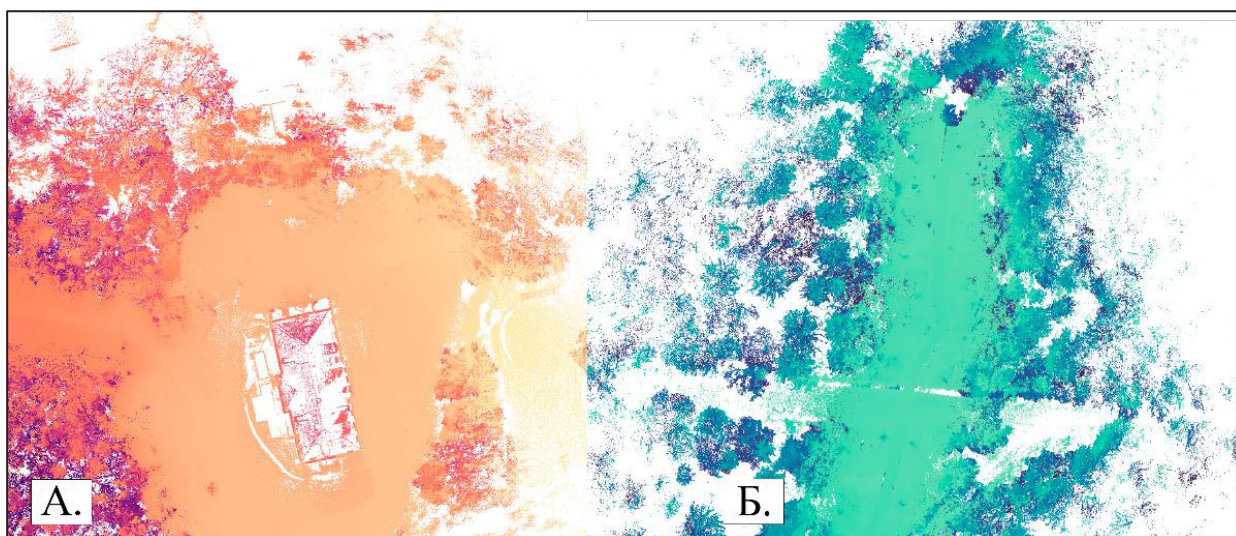
*Рис. 10. Цифровая модель местности в среде QGIS (А — «Штаб 43 Армии»,  
Б — элемент тропы «Королевский бор» Национального парка «Куршская коса»)  
Fig. 10. Digital terrain model in QGIS environment (A — “43rd Army Headquarters”,  
B — element of the trail “Korolevsky Bor” of the National Park “Curonian Spit”)*



*Рис. 11. Элемент здания на объекте «Штаб 43 Армии»  
Fig. 11. Building element at the 43rd Army Headquarters site*

В качестве дополнительного метода интеграции и визуализации данных облака точек было выполнено создание ортофотоплана (или ортомозаики), представляющего собой растровое изображение, полученное путем проекции облака точек на горизонтальную плоскость. Этот продукт обеспечивает привычное для геоинформационных систем плановое представление данных, сохраняя при этом высокую пространственную точность, присущую лазерному сканированию. Интеграция данных в таком растровом формате значительно упрощает их совместный анализ с другими стандартными геопространственными данными и облегчает визуальную интерпретацию информации об объектах исследования в контексте их планового положения (рис. 12). Разрешение ортофотоплана, полу-

ченного из облака точек для обоих объектов, составило 20 мм/пк, что позволяет детально документировать состояние поверхностей.



*Рис. 12. Ортофото из «облака точек» в среде QGIS (А — «Штаб 43 Армии»,  
Б — элемент тропы «Королевский бор» Национального парка «Куршская коса»)  
Fig. 12. Orthophotos from “point cloud” in QGIS environment  
(A — “43rd Army Headquarters”, B — element of the trail  
“Korolevsky Bor” of the National Park “Curonian Spit”)*

Исходя из анализа полученных пространственных данных, отчетливо проявилась необходимость в дальнейшем развитии программного обеспечения для геоинформационных систем путем разработки специализированных модулей. Эти расширения призваны существенно повысить функциональные возможности ГИС в части непосредственной и эффективной работы с высокоплотными облаками точек. Интеграция продвинутых инструментов обработки и анализа данных лазерного сканирования непосредственно в привычную геоинформационную среду позволит преодолеть текущие ограничения и предоставит исследователям и практикам более гибкие и мощные средства для манипулирования этим типом пространственной информации без необходимости постоянного переключения между различными программными пакетами и форматами.

В настоящее время действительно существуют отдельные специализированные программные комплексы, ориентированные на высокоуровневую обработку данных, полученных с различных платформ лазерного сканирования, включая наземное, воздушное и мобильное (Terrasolid, Metashape, 3DSurvey, Кредо 3D Scan). Эти пакеты обладают мощным инструментарием для фильтрации, классификации и моделирования на основе облаков точек. Однако, как правило, они демонстрируют ограниченные возможности взаимодействия со стандартными векторными форматами, широко используемыми в геоинформационных системах, такими как Shapefile. Желательно видеть аналогичный по мощности и спектру функций инструментарий, интегрированный непосредственно в ГИС, поскольку разрыв между возможностями специализированных пакетов и стандартным функционалом ГИС в части работы с векторными и атрибутивными данными создает определенные барьеры для комплексного геопространственного анализа.

Полученные в результате обработки данных лазерного сканирования продукты, в частности высокоточная цифровая модель рельефа и результаты классификации растительного покрова с выделением отдельных деревьев, демонстрируют потенциал, раскры-

вающий принципиально новые перспективы не только в области консервации объектов наследия, но и в их активном управлении. Эти данные позволяют осуществлять детальный динамический мониторинг состояния объектов, фиксировать малейшие изменения и получать обширные массивы пространственной информации. Учитывая растущее распространение приборной базы для лазерного сканирования и постоянное увеличение объемов собираемых данных, интеграция и эффективное использование таких информационных ресурсов в ГИС становится критически важным направлением для принятия обоснованных решений в сфере охраны окружающей среды и культурного наследия, открывая широкие возможности для дальнейшего углубленного анализа и моделирования.

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенных натурных исследований свидетельствуют о высокой эффективности применения мобильных SLAM-систем для оперативного получения высокоплотных пространственных данных как в гетерогенных природных ландшафтах (на примере экологической тропы), так и применительно к сложным антропогенным объектам (мемориальный комплекс). Несмотря на успешное получение эмпирических данных, выявлены ограничения стандартной функциональности современных геоинформационных систем (в частности QGIS) для непосредственной аналитической обработки высокоплотных облаков точек, что обуславливает необходимость конвертации исходных данных в производные геопропространственные продукты или использования специализированных программных расширений. Получение производных геопропространственных продуктов, таких как цифровые модели рельефа и местности, а также ортофотопланы, из данных SLAM-сканирования формирует надежную информационную базу для мониторинга динамических процессов в природных комплексах и точного планирования реставрационных мероприятий на объектах культурного наследия. Перспективы развития связаны с дальнейшей интеграцией SLAM-технологий в геоинформационную среду с целью повышения эффективности системы охраны и управления природным и культурным наследием, что обеспечивает доступ к пространственной информации беспрецедентного уровня детализации и точности, необходимой для принятия обоснованных управленческих решений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадюкова Е. Н., Жиндарев Л. А., Лукьянова С. А., Соловьева Г. Д., Щербина В. В.* Особенности современной динамики лагунных берегов Куршской косы, юго-восток Балтики. Литодинамика донной контактной зоны океана. М.: ГЕОС, 2009. С. 124–130.
- Воробьева Ю. С.* «...Одно время на стоянке за музеем находилось семнадцать туристических автобусов...» Интервью со старейшим сотрудником Калининградского областного историко-художественного музея Натальей Ивановной Быковой. *Время музея*, 2021. Сб. статей. Вып. 4. С. 195–211.
- Губарева И. Ю.* Редкие и охраняемые виды флоры национального парка «Куршская коса». Калининград: Издательство Балтийского федерального университета имени И. Канта, 2017. 106 с.
- Калашиникова Е. В.* Интерпретация культурного и природного наследия через проведение просветительских программ на адаптированной экотропе «Королевский бор» национального парка «Куршская коса». Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, 2021. Т. 8. С. 149–153.
- Barba S., Ferreyra C., Cotella V. A., Di Filippo A., Amalfitano S.* A SLAM Integrated Approach for Digital Heritage Documentation. International Conference on Human-Computer Interaction. Cham: Springer, 2021. P. 27–39. DOI: 10.1007/978-3-030-77411-0\_3.

*Paris L., Rossi M. L.* Quantità e Qualità Nell'utilizzo Della Tecnologia SLAM per il Rilievo Dell'architettura. *Diségno-Open Access*, 2024. P. 1857–1876. DOI: 10.3280/oa-1180-c563.

*Sano H., Miura N., Inamori M., Unno Y., Guo W., Isobe S., Iwata H.* Quantitative Genetic Aspects of Accuracy of Tree Biomass Measurement Using LiDAR. *Remote Sensing*, 2024. V. 16. No. 24. DOI: 10.3390/rs16244790.

#### REFERENCES

*Badyukova E. N., Zhindarev L. A., Lukyanova S. A., Solovyova G. D., Shcherbina V. V.* Features of the Modern Dynamics of the Lagoon Shores of the Curonian Spit, South-East Baltic Sea. Lithodynamics of the Ocean Bottom Contact Zone. Moscow: GEOS, 2009. P. 124–130 (in Russian).

*Barba S., Ferreyra C., Cotella V. A., Di Filippo A., Amalfitano S.* A SLAM Integrated Approach for Digital Heritage Documentation. *International Conference on Human-Computer Interaction*. Cham: Springer, 2021. P. 27–39. DOI: 10.1007/978-3-030-77411-0\_3.

*Gubareva I. Y.* Rare and Protected Species of Flora in the Curonian Spit National Park. Kaliningrad: Publishing House of IKBFU, 2017. 106 p. (in Russian).

*Kalashnikova E. V.* Interpretation of Cultural and Natural Heritage Through Educational Programs on the Adapted Eco-Trail “Korolevsky Bor” in the Curonian Spit National Park. Sustainable Development of Specially Protected Natural Areas. *Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference*, 2021. V. 8. P. 149–153 (in Russian).

*Paris L., Rossi M. L.* Quantità e Qualità Nell'utilizzo Della Tecnologia SLAM per il Rilievo Dell'architettura. *Diségno-Open Access*, 2024. P. 1857–1876. DOI: 10.3280/oa-1180-c563.

*Sano H., Miura N., Inamori M., Unno Y., Guo W., Isobe S., Iwata H.* Quantitative Genetic Aspects of Accuracy of Tree Biomass Measurement Using LiDAR. *Remote Sensing*, 2024. V. 16. No. 24. DOI: 10.3390/rs16244790.

*Vorobyeva Y. S.* “...At one time, there were seventeen tourist buses parked behind the museum...” Interview with Natalya Ivanovna Bykova, the Oldest Employee of the Kaliningrad Regional Museum of History and Art. *Vremya Muzeya (Museum Time)*, 2021. Collection of articles. Iss. 4. P. 195–211 (in Russian).