

Сравнение эффективности применения различного программного обеспечения в задаче оцифровки и визуализации объектов энергетики путём фотограмметрии

Е.О. Савельева^{1,А}, И.Л. Савельев^{2,А}, А.Л. Иванников^{3,В}, С.В. Солодов^{4,В}

^А Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

^В НИТУ МИСИС, Москва, Российская Федерация

¹ ORCID: 0009-0006-2362-0407, savelievaeo@gmail.com

² ORCID: 0000-0003-0865-3826, totoroboy@mail.ru

³ ORCID: 0000-0003-4680-4584, ivannickov@bk.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-8917-2524, solodov.sv@misis.ru

Аннотация

В работе проведено сравнительное исследование эффективности работы программного обеспечения для фотограмметрической оцифровки и визуализации объектов энергетики. Экспериментальная оценка выполнена на примере участка производственной котельной с использованием Agisoft Metashape, 3DF Zephyr, Meshroom, RealityCapture, Pix4D и нейросетевой платформы LumaAI. Установлено, что RealityCapture обеспечивает наиболее высокую точность реконструкции (погрешность 1–10 мм) и детализацию геометрии в условиях сложных отражающих поверхностей, благодаря гибридным алгоритмам обработки данных и GPU-оптимизации. LumaAI демонстрирует высокую скорость обработки данных и технологию достройки скрытых зон (NeRF), но неприемлема для задач оцифровки и визуализации объектов с секретностью из-за рисков утечки данных.

Выявлены критические ограничения для Meshroom и Pix4D, соответственно для первой - неэффективность при больших наборах кадров, а для второй - неадаптированность к наземной съёмке. Обозначена проблематика применения RealityCapture в РФ, обусловленная санкционными ограничениями. Результаты подтверждают необходимость разработки специализированных отечественных решений, сочетающих точность классических методов с алгоритмами ИИ при обеспечении кибербезопасности. Исследование формирует базовые критерии выбора ПО для задач цифровизации энергетических объектов, создания цифровых двойников и VR-тренажёров.

Ключевые слова: фотограмметрия, облако точек, визуализация, цифровая модель, точность, программное обеспечение.

Введение

Актуальной задачей современной энергетики является визуализация и создание точных цифровых моделей энергетических объектов [1-4] с их основными компонентами – котлами, турбинами, трансформаторами и генераторами, трубопроводами и запорно-регулирующей арматурой, для создания актуальных планов и схем, обучения персонала посредством детализированной визуализации, а также мониторинга технического состояния, планирования ремонтов и управления активами. Классические методы обмера и фиксации зачастую очень трудоёмки, сопряжены с высокими рисками для персонала, в случае необходимости проведения обмеров на высоте, в труднодоступных местах или, как это не редко бывает, при работающем оборудовании, и не обеспечивают необходимой детализации точности и полноты данных [5-8]. Что же касается лазерно-

го 3D сканирования, которое может обеспечить высокую точность и скорость сбора данных, оно имеет и ряд недостатков, которые не всегда позволяют использовать данную технологию [9-10]. Вот некоторые из них: очень высокая стоимость оборудования, невозможность съёмки в труднодоступных местах (к примеру за паровыми котлами, где обвязка не позволяет установить штатив со сканером), сложность ведения съёмки при наличии большого количества отражающих поверхностей (к примеру металлическая изоляция трубопроводов и котлов), вызывающая переотражение сигнала и как следствие задвоение или некорректное отображение объектов, необходимость отключения противопожарных систем с инфракрасными датчиками (лазерный луч приводит к ложному срабатыванию данных систем). В этом контексте фотограмметрия становится эффективным и, что немаловажно, доступным инструментом для бесконтактной оцифровки промышленных и энергетических объектов.

Применение фотограмметрии для создания высокодетализированной визуализации [11-14] и облаков точек при работе с объектами энергетики обусловлена рядом существенных преимуществ. Она позволяет с достаточной точностью и разрешением реконструировать сложную геометрию оборудования и сооружений в их реальном эксплуатационном состоянии, включая труднодоступные зоны, без вмешательства в технологический процесс и остановки производства [15]. Получаемые в результате облако точек или при необходимости полигональная 3D модель, могут служить основой для создания цифровых двойников, проведения прецизионных измерений, выявления дефектов (коррозия, деформации, повреждения изоляторов) и реалистичной визуализации объектов в интерактивных средах или системах дополненной реальности для обучения персонала и симуляции аварийных ситуаций [16-18].

Эффективность процесса фотограмметрии начиная от съёмки и заканчивая получением конечных цифровых продуктов (облака точек и 3D-моделей) в значительной степени зависит от применяемого в ходе работы программного обеспечения (ПО). Различное ПО имеет разнообразные алгоритмы сшивки изображений, построения облаков точек, фильтрации шумов и текстурирования, что напрямую влияет на точность, детализацию, скорость обработки и, в конечном счете, на пригодность результатов для решения конкретных задач. Таким образом, систематическое сравнение эффективности различного ПО в контексте оцифровки и визуализации объектов энергетики посредством фотограмметрии представляет собой насущную научно-практическую проблему, решение которой направлено на оптимизацию выбора инструментов для обеспечения максимального качества и достоверности цифровых репрезентаций.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ эффективности работы различного программного обеспечения при создании облака точек объектов энергетики путём фотограмметрии.

Методология

Эксперимент проводился с наиболее распространённым стационарным ПО для фотограмметрии: Agisoft Metashape версия 2.2.1, 3DF Zephyr версия 8.017, Meshroom версия 2023.3.0, RealityCapture версия 2.0.1, Pix4D версия 1.76.1, а также, при помощи ИИ LumaAi в несколько этапов, независимо для каждого ПО. Каждое отдельное ПО настраивалось согласно рекомендациям, представленным в официальной документации. Для стационарного ПО исходный видеофрагмент был машинным образом преобразован в 3600 отдельных кадров. Исходный видеофрагмент был снят при стационарном освещении в разрешении 5k, FPS 60 кадр/сек. и линейным объективом на камеру GoPro 10 black. Видеофрагменты для LumaAi были загружены в исходном виде. Параметры ПК для стационарного ПО: i7-13650; RTX 4060; ОЗУ DDR5 32 ГБ, для ИИ данные параметры не принципиальны, так как обработка фалов происходит на удалённых серверах. Для работы стационарного ПО фиксировалось значение времени обработки данных, для сопоставления затраченных ресурсов с полученным результатом. Объек-

том для оцифровки является участок производственной котельной, состоящий из котла с трубопроводами, запорной арматуры, насосной группы и шкафа автоматики. Все элементы имеют различную, сложную геометрию, выполнены из разнообразных материалов, в том числе с высокой отражающей способностью, расположены компактно, что затрудняет измерения классическими методами. Работа по определению точности полученных в ходе эксперимента облаков точек проводилась в NanoCAD x64 24.0. Внешний вид участка показан на рис.1.



Рис.1. Внешний вид участка котельной

Результаты

По итогу проведённого исследования были получены следующие результаты. Meshroom и Pix4D прервали работу в следствии критической ошибки и не смогли сформировать законченное облако точек. При работе Meshroom критичным оказались как количество кадров, так и сложность объекта. Для более устойчивой работы в Meshroom необходимо уменьшение количества снимков и проведение ручной классификации и калибровки позиционирования кадров. В качестве достоинства можно отметить наличие возможности изменения работы данного ПО за счёт открытой нодовой системы программирования, что даёт возможность усовершенствовать работу данного ПО. Pix4D так же не смогла обработать исходный материал несмотря на то, что данное ПО, ориентированное на аэрофотосъёмку, поддерживающее гораздо большее количество кадров и в том числе есть возможность работы непосредственно с видео.

Работа Agisoft Metashape заняла 1 час 30 минут и на выходе полученный результат не может в полной мере считаться удовлетворительным. Облако содержит большое количество шума, множественные неточности и отклонения, что не даёт возможности использовать его ни для визуализации, ни для инжиниринга (рис.2a).

3DF Zephyr работал 4 часа и показал результат лучше, чем Agisoft Metashape. Полученное облако точек имеет понятную чёткую структуру, определены расстояние и траектория движения камеры, прослеживаются основные черты крупных объектов (насосы, котёл, шкаф автоматики). Однако облако сильно разрежено, имеет шум, маленькие объекты (запорная арматура, контрольно-измерительные приборы) и трубопроводы неразличимы (рис.2b).

RealityCapture (RC) успешно справился с поставленной задачей за 3 часа. Полученное в ходе работы облако чёткое с верно определёнными дистанцией и траекторией камеры. Корректно отображается геометрия и текстуры всех элементов (рис.2c). Отклонение по основным размерам находится в пределах от 1 до 10 мм, причём наиболь-

шее значение наблюдается на больших однородных плоскостях (например дверцы шкафа автоматики пол и стены). Данные отклонения объясняются малым количеством уникальных особенностей изображения (трещины, разнообразие текстур и геометрических форм) для сопоставления точек между кадрами необходимых для стабильной работы алгоритма SfM (Structure from Motion). Однако, полученная точность и плотность облака позволяют использовать его в инженерных задачах, например для создания рабочей документации, что особенно актуально для давно введённых в эксплуатацию объектов на которых утеряна или не актуальна документация. Благодаря широкому спектру форматов, поддерживаемых RC (fbx, obj, ply, abc, glb, xyz, las, stl и другие) и возможности непосредственной интеграции в Unreal Engine результаты работы могут широко применяться в инженерии и визуализации объектов энергетики [19]. Помимо вышеуказанного RealityCapture имеет ряд примечательных технологии, позволяющих давать более высокий результат по сравнению с аналогами. К ним можно отнести гибридную обработку, дающую возможность одновременного использования фото и лидарных данных (лидар обеспечивает метрическую точность), GPU-ускорение на уровне ядра и распределение задач на несколько GPU/компьютеров, автоматическая калибровка камер, привязка моделей к системам координат (GPS-метки, GCP). Что же касается недостатков, на момент написания публикации в качестве основного можно выделить сложность установки. Официально данное ПО недоступно в РФ и для работы потребуется создание зарубежного аккаунта, перевод операционной системы на европейский или американский регион и подключение VPN.

Последней рассмотренной в ходе работы системой стала нейронная сеть LumaAI. В результате обработки видео было получено чёткое облако точек, без искажений текстуры и геометрии (рис.2d). Отклонение по основным размерам находятся в пределах от 1 до 15 мм, что сопоставимо с результатами RealityCapture, однако стоит отметить, что для больших плоскостей отклонение достигает значений $\pm 10-50$ мм. Облако точек выгружается в форматах основных форматах ply, xyz и las. Выгодным отличием LumaAI от всех рассмотренных ПО является наличие технологии NeRF (Neural Radiance Fields), за счёт которой нейросеть способна предсказывать цвет и плотность точек в 3D-пространстве на основе видеоданных, что позволяет дотраивать геометрию даже на участках, скрытых от камеры. Также стоит отметить, что в отличие от стационарного ПО применение LumaAI даёт возможность одновременно обрабатывать десятки различных объектов и не задействовать собственные вычислительные мощности, что позволяет проводить декомпозицию крупных объектов и обрабатывать все элементы одновременно тем самым сокращая время работы. В качестве основного минуса можно отметить безопасность в связи с тем, что все данные выгружаются на удалённые сервера и могут стать доступны третьим лицам.

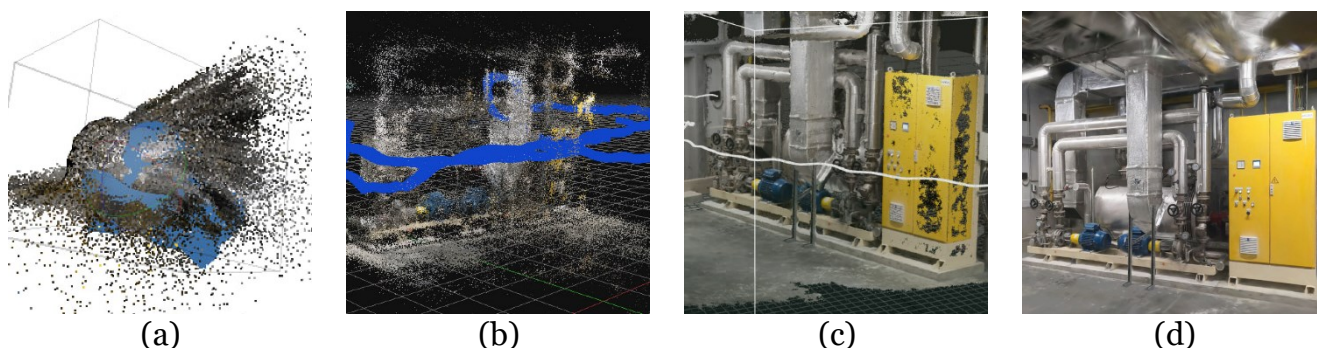


Рис.2. Визуальное представление полученных облаков точек: а – Agisoft Metashape, b – 3DF Zephyr, c – RealityCapture, d – LumaAI

Обсуждение

Результаты проведённого эксперимента демонстрируют существенные различия в эффективности ПО для фотограмметрической оцифровки и визуализации сложных энергетических объектов. RealityCapture имеет гибридные алгоритмы, способные комбинировать данные разных типов (фото + лидар), обеспечивая метрическую точность (1–10 мм), критичную для инженерных задач. GPU-оптимизация и распределение вычислений на RTX-картах сокращает время обработки в 1,3–4 раза по сравнению с аналогами (Zephyr, Metashape). Адаптивная фильтрация спектральных характеристик металлов даёт устойчивость к бликам (отражающие поверхности металлических трубы и изоляции). Поддержка более 50 форматов и прямой экспорт в Unreal Engine упрощают создание VR-тренажёров и цифровых двойников. Основным ограничением является сложность использования ПО в РФ, требующая нестандартных решений (смена региона ОС, VPN), что в свою очередь повышает риски для корпоративного внедрения. LumaAI демонстрирует высокую скорость обработки видео без нагрузки на локальные ресурсы [20], технология NeRF позволяет реконструировать скрытые зоны, а масштабируемость даёт возможность параллельной обработки десятков объектов. Критическими недостатками являются погрешность на плоскостях до 50 мм, невозможность работы в отсутствии сети интернет или загруженности серверов, а главное, риски, связанные с передачей данных энергообъектов на зарубежные сервера. Agisoft Metashape показала не самые хорошие результаты, однако это может объясняться особенностями объекта не давшими возможность выявить сильные стороны ПО, например, высокий потенциал Metashape в мультиспектральном анализе.

Причины провала Meshroom связаны с CPU-зависимостью и отсутствием оптимизации для больших наборов кадров. Для Pix4D критичными стали ориентированность на аэрофотосъёмку – алгоритмы не адаптированы к наземной съёмке с динамическими ракурсами, проблемы с обработкой бликов и низкой текстурной вариативностью.

Заключение

Результаты исследования демонстрирует существенную зависимость эффективности фотограмметрической оцифровки энергетических объектов от выбора программного обеспечения. Результаты эксперимента подтверждают, что RealityCapture обеспечивает высокую точность реконструкции и детализации геометрии в сложных условиях объектов энергетики, включая элементы с высокой отражающей способностью. Однако ограничение доступности данного ПО в РФ, обусловленная санкционными барьерами, создаёт значительные сложности для его внедрения в отечественную энергетическую отрасль. Альтернативные решения, такие как LumaAI, демонстрируют высокую скорость обработки и хорошую точность, но неприемлемы для инженерных задач для объектов с секретностью из-за рисков утечки данных.

Полученные данные подчёркивают необходимость развития отечественных специализированных фотограмметрических инструментов, адаптированных к специфике промышленности и энергообъектов и обеспечивающих требуемый уровень информационной безопасности. Перспективными направлениями представляются:

1. Разработка отечественных гибридных методик, сочетающих классические алгоритмы SfM/MVS с нейросетевыми подходами для компенсации их взаимных ограничений.
2. Создание решений с акцентом на безопасность данных и поддержку отечественных САПР;
3. Стандартизация протоколов оценки точности для сложных промышленных объектов.

Не менее важной задачей является формирование нормативно-правовой базы для выбора программного обеспечения, применяемого в задачах цифровизации энергетики.

ческой инфраструктуры, где точность реконструкции напрямую влияет на безопасность эксплуатации и качество цифровых двойников.

Благодарности

Данное исследование проведено при финансовой поддержке Московского Политехнического Университета в рамках гранта имени В.Е. Фортова.

Список литературы

1. Толоконский А.О., Ковалёнок Д.Г. Визуализация участка сборки и контроля ТВС реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 с использованием технологий виртуальной реальности (2025). Научная визуализация 17(2): 23–35. DOI: 10.26583/sv.17.2.02
2. Мальцев А.В. Компьютерное моделирование и визуализация колеи на твёрдых поверхностях в виртуальной среде (2023). Научная визуализация 15(2): 80–89. DOI: 10.26583/sv.15.2.07
3. Тимохин П.Ю., Михайлюк М.В. Гибридная визуализация с Vulkan-OpenGL: технология и методы реализации в системах виртуальной среды (2023). Научная визуализация 15(3): 7–17. DOI: 10.26583/sv.15.3.02
4. Крулл А., Бухгольц Т., Юг Ф. Noise2void — обучение шумоподавлению на одиночных зашумленных изображениях // Труды конференции IEEE по компьютерному зрению и распознаванию образов (CVPR). 2019. Т. 32. С. 2124–2132. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00223
5. Буяльский А.А., Савельев И.Л. Создание цифровых двойников объектов энергетики. В сборнике: СНК-2024. материалы LXXIV международной студенческой научной конференции Московского Политеха. Москва, 2024. С. 183–187.
6. Бондарева Н.А. Графовые нейронные сети и задачи верификации изображений // Труды 33-й международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению GraphiCon 2023. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия, 19–21 сентября 2023 г. С. 317–327. DOI: 10.20948/graphicon-2023-317-327
7. Савельева Е.О., Савельев И.Л. Особенности разработки инженерных VR и AR проектов студенческими командами. В сборнике: Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2025. Сборник научных трудов XI Международной конференции. Москва, 2025. С. 374.
8. Ван З., Бовик А., Шейх Х., Симончелли Э. Оценка качества изображения: от видимости ошибок к структурному сходству // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Т. 13, № 4. С. 600–612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861
9. Маццонетто И., Кастелларо М., Купер Р., Бригадои С. Использование фотограмметрии на основе смартфона для улучшения локализации и регистрации нейровизуализационных датчиков, устанавливаемых на scalp // Scientific Reports. 2022. Т. 12. С. 1–14.
10. Хомолле С., Остенвельд Р. Использование 3D-сканера структурированного света для улучшения моделирования источников ЭЭГ за счет более точного определения позиций электродов // Journal of Neuroscience Methods. 2019. Т. 326. С. 1–8.
11. Конопацкий Е.В., Бездитный А.А. Кинематическая операция построения геометрических тел в точечном исчислении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Т. 22, № 3. С. 79–88. DOI: 10.14529/build220309
12. Валье М.П. де К.А., Гислени К.В., Гасперин Ф.Ф. де, Леал Р.Л., Силва Ф.П. да, Брускато У.М. Предложение по автоматизированному коду для преобразования полигональных сеток органических форм в пригодные для САПР NURBS-поверхности // Gestão & Tecnologia de Projetos. 2022. Т. 17, № 2. С. 5–17. DOI: 10.11606/gtp.v17i2.166353

13. Кондыбаева А.Б., Солодов С.В. Трикубическая интерполяция в задачах визуализации научных данных. // Тезисы докладов конференции «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECONF). 8840118 DOI: 10.1109/WECONF.2019.8840118
14. Еремина О.Ю., Томшин Е.А. О методике использования лидара в ходе экологического мониторинга опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 5. С. 13-18. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-5-13-18
15. Гвоздев Е.В. Анализ критериев и методов оценки организационных рисков на взрывопожароопасных предприятиях // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 7. С. 48-55. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-7-48-55
16. Дерябин С.А., Кондратьев Е.И., Рзазаде Ульви Азар оглы, Темкин И.О. Язык моделирования архитектуры цифрового предприятия: методологический подход к проектированию систем Индустрии 4.0 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 97–110. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_97.
17. Полянская А., Савчук С., Дудек М., Сала Д., Пазынич Ю., Цихонь Д. Влияние цифровой зрелости на эффекты устойчивого развития в энергетическом секторе в условиях Индустрии 4.0 // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022. № 6. С. 97–103. DOI: 10.33271/nvngu/2022-6/097
18. Крюков А., Суслов К., Крюков А. Расчет режимов и электромагнитных влияний протяженной передачи сверхвысокого напряжения на трубопровод на основе цифровых моделей // Communications in Computer and Information Science. 2025. Т. 1989. С. 3–23. DOI: 10.1007/978-3-031-70966-1_1
19. Савельева Е.О., Савельев И.Л., Иванников А.Л., Солодов С.В. Перспективы интеграции технологий виртуальной и дополненной реальности в интеллектуальные системы управления безопасностью труда // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 8. С. 58-62. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-8-58-62.
20. Смелцер К., Эрвиг М., Метойер Р. Трансформационный подход к визуализации данных // Труды международной конференции по генеративному программированию: концепции и experience (GPCE 2014). 2014. С. 53-62. DOI: 10.1145/2658761.2658769

Performance Comparison of Various Software Tools in Photogrammetry-Based Digitization and Visualization of Energy Infrastructure Objects

Ekaterina O. Saveleva^{1,A}, Ilya L. Savelev^{2,A}, Alexander L. Ivannikov^{3,B}, Sergey V. Solodov^{4,B}

^A Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

^B NUST MISIS, Moscow, Russian Federation

¹ ORCID: 0009-0006-2362-0407, savelievaeo@gmail.com

² ORCID: 0000-0003-0865-3826, totoroboy@mail.ru

³ ORCID: 0000-0003-4680-4584, ivannickov@bk.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-8917-2524, solodov.sv@misis.ru

Abstract

This study presents a comparative analysis of software efficiency for photogrammetric digitization and visualization of energy infrastructure objects. Experimental evaluation was conducted on a production boiler house section using Agisoft Metashape, 3DF Zephyr, Meshroom, RealityCapture, Pix4D, and the neural platform LumaAI. Results demonstrate that RealityCapture delivers superior reconstruction accuracy (1-10 mm error) and geometric detail preservation under complex reflective surface conditions, attributable to its hybrid data processing algorithms and GPU optimization. LumaAI exhibits rapid data processing capabilities and hidden area reconstruction technology (NeRF), but remains unsuitable for digitizing classified infrastructure due to data leakage risks.

Critical limitations were identified for Meshroom (inefficiency with large frame sets) and Pix4D (inadaptability to terrestrial photogrammetry). Sanction-related deployment challenges for RealityCapture in the Russian Federation are highlighted. The findings substantiate the necessity for specialized domestic solutions integrating classical method precision with AI algorithms while ensuring cybersecurity. This research establishes fundamental software selection criteria for energy asset digitization, digital twin development, and VR simulator creation.

Keywords: photogrammetry, point cloud, visualization, digital model, accuracy, software.

References

1. A.O. Tolokonnskiy, D.G. Kovalionok. Visualization of the Assembly and Control Area of the BREST-OD-300 Reactor FA Using Virtual Reality Technologies (2025). Scientific Visualization 17.2: 23 - 35, DOI: [10.26583/sv.17.2.02](https://doi.org/10.26583/sv.17.2.02)
2. A.V. Maltsev. Computer Simulation and Visualization of Wheel Tracks on Solid Surfaces in Virtual Environment (2023). Scientific Visualization 15.2: 80–89, DOI: [10.26583/sv.15.2.07](https://doi.org/10.26583/sv.15.2.07)
3. P.Yu. Timokhin, M.V. Mikhaylyuk. Hybrid Visualization with Vulkan-OpenGL: Technology and Methods of Implementation in Virtual Environment Systems (2023). Scientific Visualization 15.3: 7–17, DOI: [10.26583/sv.15.3.02](https://doi.org/10.26583/sv.15.3.02)
4. Savelyeva, E.O., Savelyev, I.L., Ivannikov, A.L., & Solodov, S.V. (2025). XR-technologies in intelligent control systems for mining enterprises. Sustainable development of mountain territories, 17(2(64)), 1024-1032. doi: [10.21177/1998-4502-2025-17-2-1024-1032](https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-2-1024-1032)

5. Buyalskiy A.A., Saveliev I.L. Creation of Digital Twins for Energy Facilities. In: *SNK-2024: Proceedings of the LXXIV International Student Scientific Conference of Moscow Polytechnic University*. Moscow, 2024. Pp. 183-187.
6. Bondareva N.A. Graph Neural Networks and Image Verification Tasks // Proceedings of the 33rd International Conference on Computer Graphics and Machine Vision GraphiCon 2023. V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, September 19-21, 2023. P. 317-327. DOI: 10.20948/graphicon-2023-317-327
7. Savelieva E.O., Saveliev I.L. Features of Developing Engineering VR and AR Projects by Student Teams. In: *Laser and Plasma Research and Technologies - LaPlaz-2025: Proceedings of the XI International Conference*. Moscow, 2025. P. 374.
8. Wang Z., Bovik A., Sheikh H., Simoncelli E. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13, no. 4. P. 600-612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861
9. Mazzonetto I., Castellaro M., Cooper R., Brigadoi S. Leveraging smartphone-based photogrammetry for improved localization and registration of scalp-mounted neuroimaging sensors // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 1-14.
10. Homolle S., Oostenveld R. Using a structured-light 3D scanner to improve EEG source modeling with more accurate electrode positions // Journal of Neuroscience Methods. 2019. Vol. 326. P. 1-8.
11. Konopatskiy E.V., Bezditny A.A. Kinematic operation of constructing geometric bodies in point calculus // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture. 2022. Vol. 22, no. 3. P. 79-88. DOI: 10.14529/build220309
12. Valle M.P. de C.A., Gisleni K.V., Gasperin F.F. de, Leal R.L., Silva F.P. da, Bruscatto U.M. A proposal for an automated code to convert polygonal meshes of organic forms into CAD-suitable NURBS surfaces // Gestão & Tecnologia de Projetos. 2022. Vol. 17, no. 2. P. 5-17. DOI: 10.11606/gtp.v17i2.166353.
13. Kondybayeva A.B., Solodov S.V. Tricubic Interpolation in Scientific Data Visualization Problems. Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems Weconf Conference Proceedings, 2019, 8840118 DOI: 10.1109/WECONF.2019.8840118
14. Eremina O.Yu., Tomshin E.A. On the methodology of using LiDAR in the environmental monitoring of hazardous production facilities. Occupational Safety in Industry. 2025. No. 5. Pp. 13-18. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-5-13-18
15. Gvozdev E.V. Analysis of criteria and methods for assessing organizational risks at explosive and fire-hazardous enterprises. Occupational Safety in Industry. 2025. No. 7. Pp. 48-55. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-7-48-55
16. Deryabin S. A., Kondratev E. I., Rzazade Ulvi Azar ogly, Temkin I. O. Digital Mine architecture modeling language: Methodological approach to design in Industry 4.0. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2022;(2):97-110. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_97.
17. Polyanska A., Savchuk S., Dudek M., Sala D., Pazynich Y., Cichoń D. Impact of digital maturity on sustainable development effects in energy sector in the condition of industry 4.0. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2022, (6), pp. 97-103. DOI: 10.33271/nvngu/2022-6/097.
18. Kryukov A., Suslov K., Kryukov A. Calculation of Modes and Electromagnetic Influences of a Long-Distance Ultra-high Voltage Power Transmission to Pipeline Based on Digital Models. Communications in Computer and Information Science, 2025, 1989 CCIS, pp. 3-23. DOI: 10.1007/978-3-031-70966-1_1.
19. Saveleva E.O., Savelev I.L., Ivannikov A.L., Solodov S.V. Prospects of Virtual and Augmented Reality Technology Integration into Intelligent Occupational Safety Management Systems. Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry. 2025. № 8. pp. 58-62 (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2025-8-58-62.

20. Smelcer C., Erwig M., Metoyer R. A transformational approach to data visualization // Proceedings of the International Conference on Generative Programming: Concepts and Experiences (GPCE 2014). 2014. P. 53-62. DOI: 10.1145/2658761.2658769