

АКТУАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕЛИОРАЦИИ И ГИДРОТЕХНИКИ

Научная статья

УДК 626/627:528.74:004.942

Практический опыт использования современных методов натурных обследований (лазерного сканирования и фотограмметрии) гидротехнических сооружений Азовской оросительной системы

Таисия Сергеевна Пономаренко¹, Алексей Николаевич Рыжаков²

^{1, 2}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹rosniipmopvapk@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2003-1686>

²xrust.89@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9268-255X>

Аннотация. Целью данного исследования стало комплексное применение методов фотограмметрии и лазерного сканирования в сравнении с классическими методами геодезической съемки и обмерных работ при моделировании объектов мелиорации на примере гидротехнических сооружений Азовского магистрального канала. **Материалы и методы.** В качестве источника фотографий использовалась камера смартфона с включенной функцией геопозиционирования. Для сканирования использовался мобильный лазерный SLAM сканер XGRIDS Lixel L2 Pro 32/120 RTK Survey Grade с функцией RTK. Обработка полевых данных производилась в специализированном программном обеспечении Agisoft Metashape Professional. **Результаты и обсуждение.** Метод фотограмметрии применялся на перегораживающем сооружении (ПК379 + 20). Лидарное сканирование производилось на двух участках канала с ПК137 + 35 по ПК143 + 5 (в районе дюкера № 1) и с ПК207 + 20 по ПК277 + 50 (включая дюкер № 2 и автомобильный мост на ПК276 + 40) посредством использования мобильного лазерного SLAM сканера. В исследовании рассматривается процесс сбора исходных данных, их обработка и создание 3D-моделей объектов; уделено внимание этапу классификации точек, который критически важен для корректного выделения поверхности земли и устранения шумов. Продемонстрирована возможность исправления недостатков, возникших на этапе сбора данных, за счет гибкости программных инструментов. **Выводы.** Оба метода позволяют эффективно получать детализированные 3D-модели, проводить измерения и визуализировать объекты, включая труднодоступные зоны. Вместе с тем выявлены ограничения: фотограмметрия чувствительна к освещению, а лидарное сканирование – к растительности и качеству полевых работ. Отмечено отсутствие нормативной базы, регламентирующей точность и порядок выполнения работ. Тем не менее, при грамотном сочетании цифровых и традиционных геодезических методов данные технологии могут успешно применяться для мониторинга, проектирования и реконструкции гидромелиоративных объектов.

Ключевые слова: цифровизация мелиоративной отрасли, лидарное сканирование, фотограмметрия, SLAM-сканирование, трехмерное моделирование

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные научные исследования в области мелиорации и гидротехники» (г. Новочеркасск, 28 мая 2026 г.).

Для цитирования: Пономаренко Т. С., Рыжаков А. Н. Практический опыт использования современных методов натурных обследований (лазерного сканирования и фотограмметрии) гидротехнических сооружений Азовской оросительной системы // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2026. Т. 99, № 2. С. 80–95.



CURRENT SCIENTIFIC RESEARCH IN THE FIELD OF LAND RECLAMATION AND HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

Practical experience in using modern methods of on-site surveys (laser scanning and photogrammetry) of hydraulic structures of the Azov irrigation system

Taisiya S. Ponomarenko¹, Alexey N. Ryzhakov²

^{1, 2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

¹rosniipmovpvapk@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2003-1686>

²xrust.89@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9268-255X>

Abstract. Purpose: to apply comprehensively photogrammetry and laser scanning methods in comparison with classical geodetic surveying and measurement techniques in modeling land reclamation projects using the Azov Main Canal hydraulic structures as an example. **Materials and methods.** A smartphone camera with enabled geolocation was used as a source of photographs. A mobile SLAM laser scanner XGRIDS Lixel L2 Pro 32/120 RTK Survey Grade with RTK functionality was used for scanning. Field data were processed using Agisoft Metashape Professional software. **Results and discussion.** Photogrammetry was applied to the control structure (PK379 + 20). Lidar scanning was carried out on two sections of the canal from PK137 + 35 to PK143 + 5 (in the area of siphon no.1) and from PK207 + 20 to PK277 + 50 (including siphon no. 2 and the highway bridge at PK276 + 40) using a mobile laser SLAM scanner. The study considers the process of collecting and processing initial data and creating 3D models of objects. Attention is paid to the point classification stage, which is critical for the correct detection of the ground surface and noise elimination. The possibility of correcting the deficiencies that arose at the data collection stage due to the flexibility of software tools is demonstrated. **Conclusions.** Both methods allow for the efficient production of detailed 3D models, taking measurements, and visualizing objects, including hard-to-reach areas. At the same time, limitations were identified: photogrammetry is sensitive to lighting, while lidar scanning is sensitive to vegetation and the quality of fieldwork. A lack of a regulatory framework regulating the accuracy and procedure for performing these works was noted. However, with the proper combination of digital and traditional surveying methods, these technologies can be successfully applied to monitoring, designing, and reconstructing irrigation and drainage facilities.

Keywords: irrigation industry digitalization, lidar scanning, photogrammetry, SLAM scanning, 3D modeling

Evaluation of the research results: the fundamental principles of the article were reported at the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists “Current Scientific Research in the Field of Land Reclamation and Hydraulic Engineering” (Novocherkassk, May 28, 2026).

For citation: Ponomarenko T. S., Ryzhakov A. N. Practical experience in using modern methods of on-site surveys (laser scanning and photogrammetry) of hydraulic structures of the Azov irrigation system. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2026;99(2):80–95. (In Russ.).

Введение. Цифровизация мелиоративной отрасли требует не только перевода документов в электронный вид, но и внедрения современных ме-

тодов обследования и моделирования объектов на основе информационных технологий [1–3]. Трехмерное моделирование гидротехнических сооружений (ГТС) с использованием фотограмметрии и лазерного сканирования позволяет значительно повысить детализацию, сократить время полевых работ и получить точные данные о состоянии объектов, включая деформации и геометрические характеристики [4–6].

Фотограмметрией называется технология создания трехмерных моделей с помощью обычных фотоснимков объекта, выполненных с различных ракурсов. Фотограмметрия основана на триангуляции – сопоставлении точек на множестве фотографий, сделанных с разных ракурсов. Метод доступен, так как для съемки может использоваться даже смартфон, однако сильно зависит от освещения и наличия текстуры на поверхностях [7–8].

Лидарное сканирование, напротив, не требует освещения и обеспечивает высокую плотность точек за счет излучения лазерных импульсов. Особенно перспективна технология SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), позволяющая в реальном времени определять положение сканера и строить облако точек без привязки к GNSS. Хотя точность SLAM-сканирования несколько ниже, чем у стационарных систем (до 5 см), скорость сбора данных значительно выше [9–10].

Несмотря на преимущества, оба метода сталкиваются с отсутствием нормативной базы, регламентирующей требования к точности, содержанию и оформлению трехмерных моделей [1]. Тем не менее, при комбинации с геодезическими методами они могут удовлетворять требованиям действующего законодательства [11].

Целью исследования стало сравнение фотограмметрии и мобильного лидарного сканирования с классическими геодезическими методами при обследовании гидротехнических сооружений (ГТС) Азовского магистрального канала (МК).

Материалы и методы. Полевые работы выполнены на участке Азовского МК. Объектами исследования стали: дюкер № 1 (ПК140 + 55), дюкер № 2 (ПК214 + 35), перегораживающее сооружение (ПК379 + 20) и автомобильный мост (ПК276 + 40).

Для геодезической привязки использовалось GNSS-оборудование Leica GS18 в режиме RTK. Фотограмметрическая съемка перегораживающего сооружения выполнена с помощью смартфона с геопозиционированием. Лидарное сканирование участков канала (ПК137 + 35 – ПК143 + 5 и ПК207 + 20 – ПК277 + 50) проведено с применением мобильного SLAM-сканера XGRIDS Lixel L2 Pro 32/120 RTK Survey Grade (рисунок 1). Обработка данных производилась в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional.



Рисунок 1 – Мобильный лазерный 3D SLAM сканер XGRIDS Lixel L2 Pro 32/120 RTK Survey Grade (автор фото А. Н. Рыжаков)

Figure 1 – Mobile 3D SLAM laser scanner XGRIDS Lixel L2 Pro 32/120 RTK Survey Grade (photo by A. N. Ryzhakov)

Схема расположения объектов приведена на рисунке 2.

5

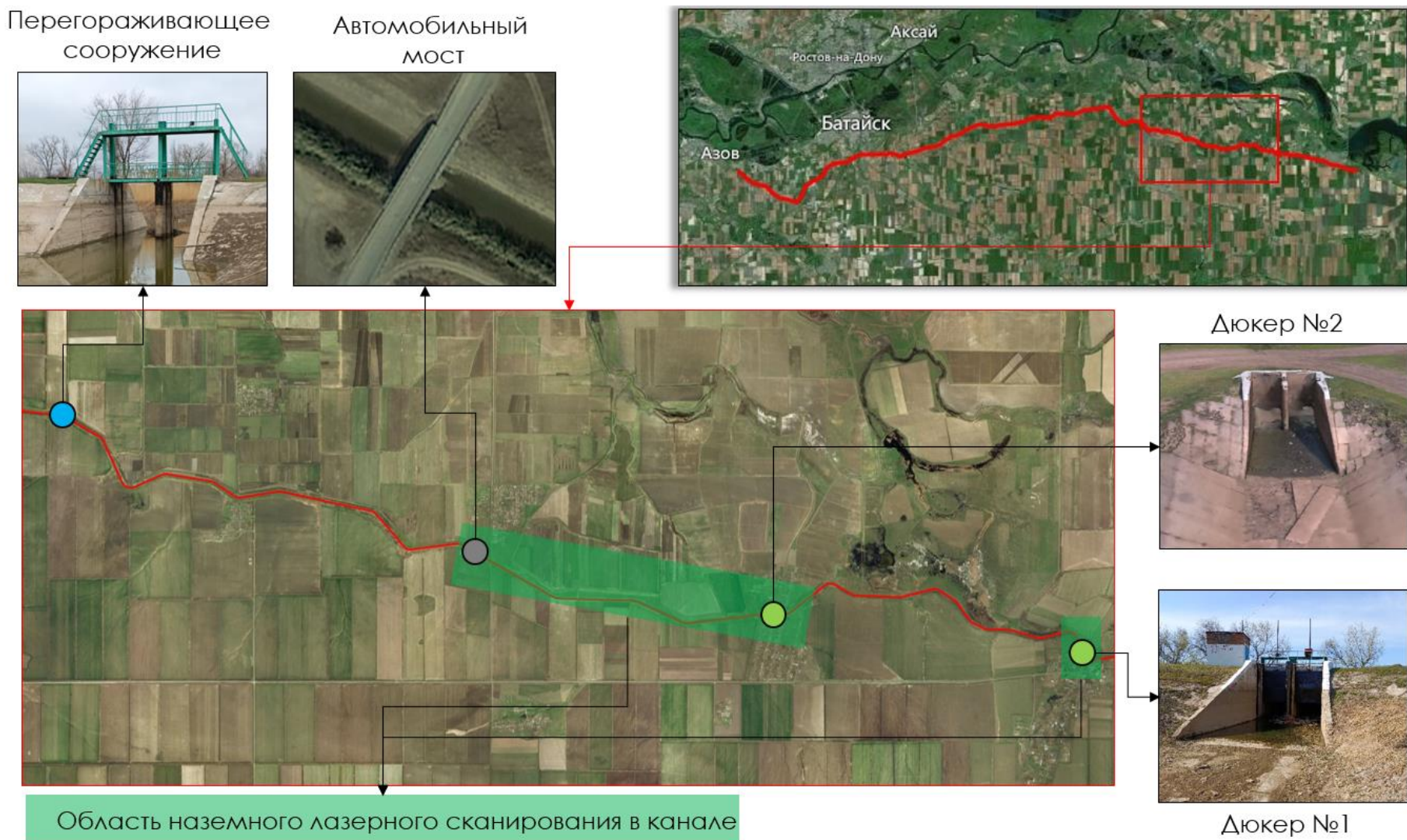
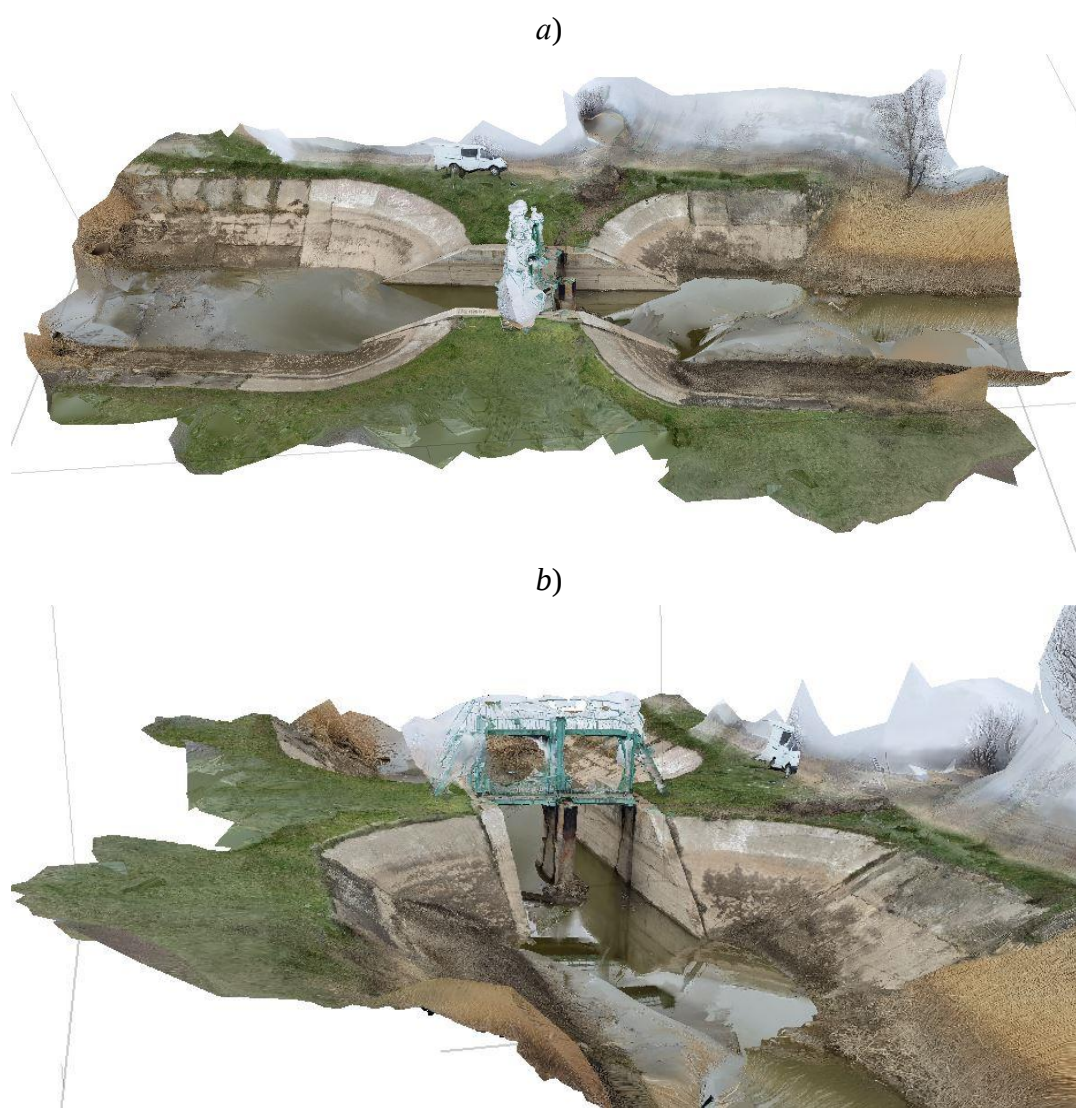


Рисунок 2 – Схема расположения объектов исследования на Азовском магистральном канале
Figure 2 – Layout of research objects on the Azov Main Canal

Результаты и обсуждение. При проведении съемки ГТС методом фотограмметрии было сделано более 150 снимков перегораживающего сооружения с различных ракурсов. При подготовке к обработке снимков были исключены кадры с посторонними объектами (люди, растительность, транспорт), а также снимки с цифровым зумом, так как они нарушают геометрию сцены и часто отбраковываются на этапе выравнивания.

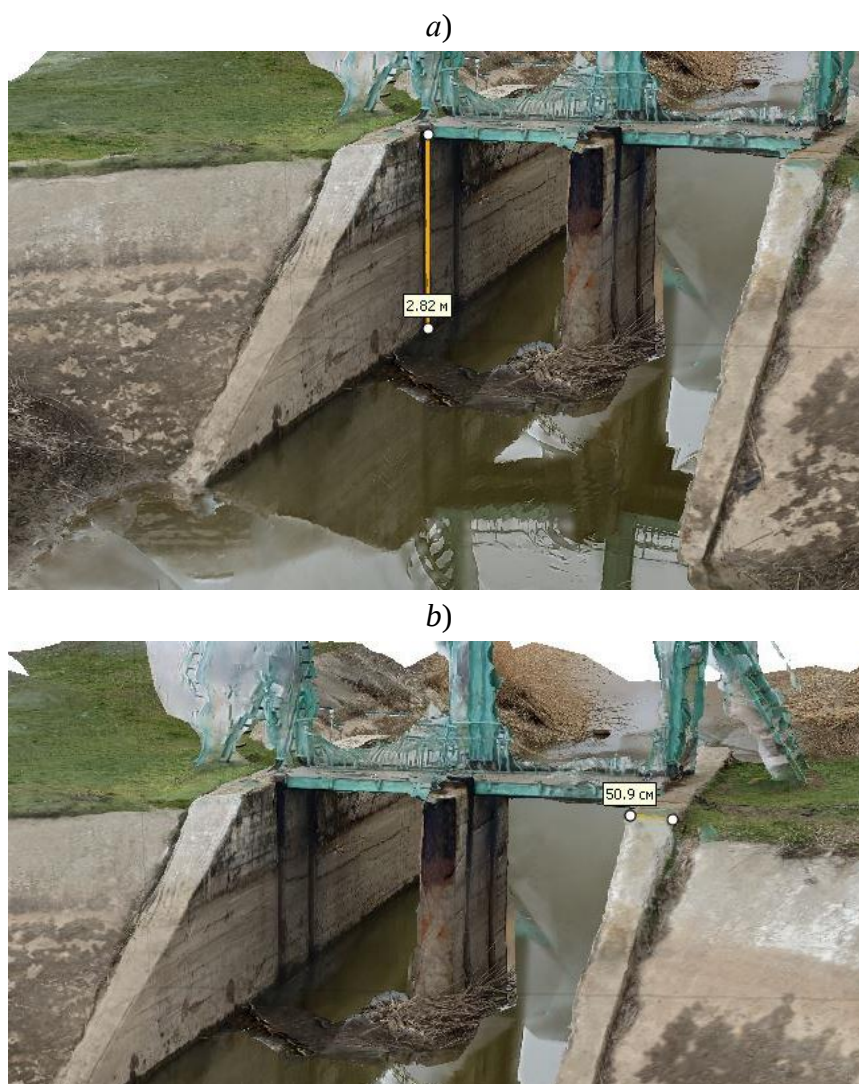
После выравнивания было получено облако точек (около 6,5 млн точек), на основе которого была построена трехмерная модель (рисунок 3).



a) вид на модель ГТС с левого берега; *b)* вид на модель ГТС с верхнего бьефа
a) view of the hydroelectric power station model from the left bank; *b)* view of the hydraulic structure model with a control structure

Рисунок 3 – Трехмерная модель перегораживающего сооружения
Figure 3 – Three-dimensional model of the barrier structure

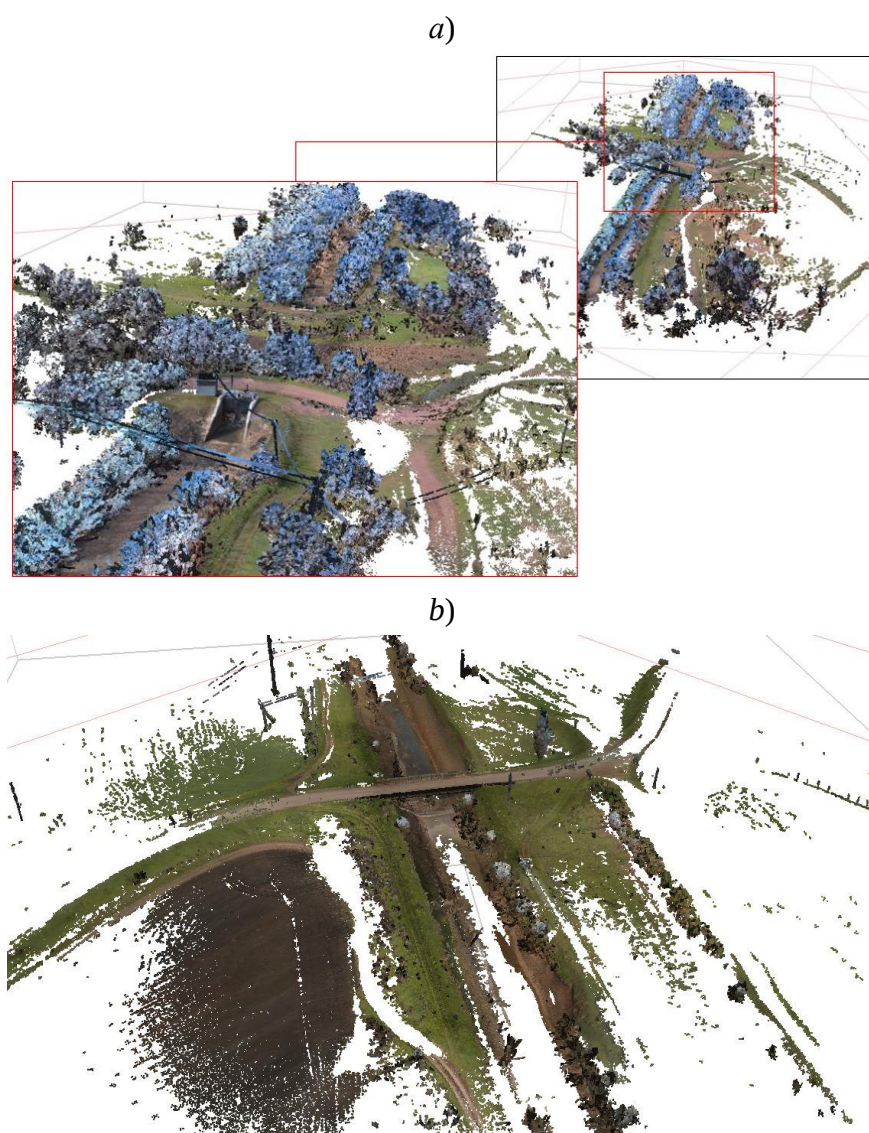
Для привязки к местной системе координат были использованы 12 опорных точек (маркеров), координаты которых были определены GNSS-оборудованием: 4 – по верху бетонных плит, 8 – по урезу воды. Привязка модели обеспечивает корректный масштаб и позволяет выполнять измерения с точностью до миллиметра: высоты, ширины, отметок поверхности и т. д. (рисунок 4). Общее время работ: ~ 1 ч на съемку и ~ 2 ч на обработку (включая рендеринг).



a) измерение высоты от верха ГТС до уреза воды; *b)* измерение ширины бетонной плиты
a) measuring the height from the top of the hydraulic structure to the water's edge;
b) measuring the concrete slab width

Рисунок 4 – Пример измерений элементов модели инструментами ПО Agisoft Metashape Professional
Figure 4 – Example of measuring model elements using Agisoft Metashape Professional software tools

Лидарное сканирование было выполнено в ходе одного рабочего дня, в результате чего было получено 10 наборов данных в формате .las (~ 40 ГБ), охватывающих ~ 7,5 км канала. Обработка каждого набора заняла несколько часов. В отличие от фотограмметрии, облако точек доступно сразу после съемки, но требует тщательной постобработки. Примеры облаков точек представлены на рисунке 5. На их основе построены модели и профили, позволяющие измерять расстояния и высотные отметки (рисунок 6).

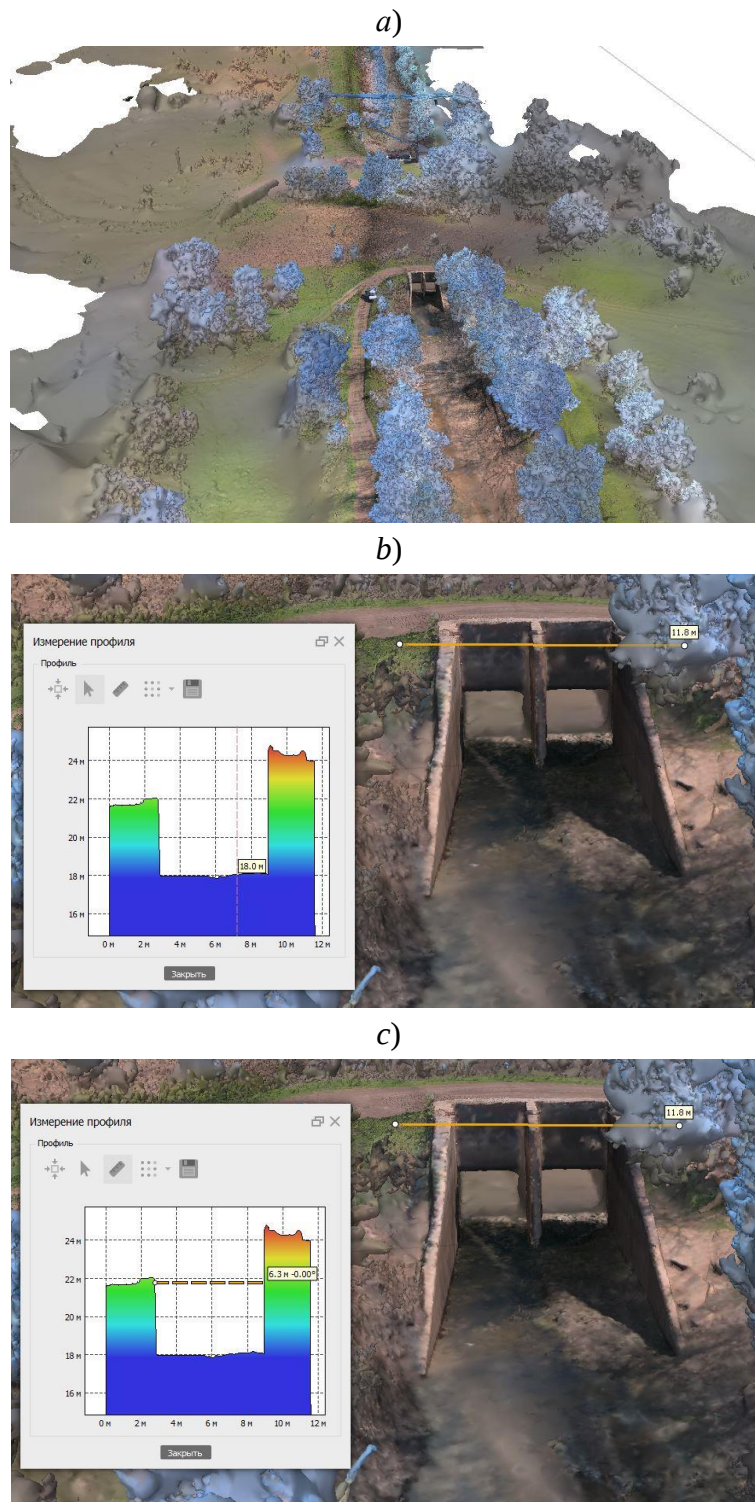


а) дюкер № 1; б) автомобильный мост на ПК276 + 40

a) siphon no. 1; b) highway bridge on PK276 + 40

**Рисунок 5 – Примеры облаков точек, полученных
с помощью лидарного сканирования**

Figure 5 – Examples of point clouds obtained using lidar scanning



a) модель дюкера № 1; вид (вверх по течению на выходной оголовок ГТС);
 b) пример построения профиля и получение отметки; c) пример построения
 профиля и получение расстояния
 a) siphon model no. 1; view (upstream of the outlet hatchway of the hydraulic structure);
 b) an example of building a profile and obtaining a mark; c) an example
 of constructing a profile and obtaining a distance

Рисунок 6 – Пример получения профиля и производства измерений
Figure 6 – An example of obtaining a profile and taking measurements

Однако в ряде случаев модель оказалась некорректной (рисунок 7).



**Рисунок 7 – Пример некорректного моделирования
водопроводящего сооружения дюкера № 2**
**Figure 7 – An example of incorrect modeling of the water
supply structure of siphon No. 2**

Это связано с двумя факторами: недостаточным качеством полевых работ – заросшие берега, вода в канале и отсутствие отраженного сигнала от дна привели к пробелам в данных (рисунок 8); отсутствием классификации точек – растительность и шум не были удалены, что исказило профиль.

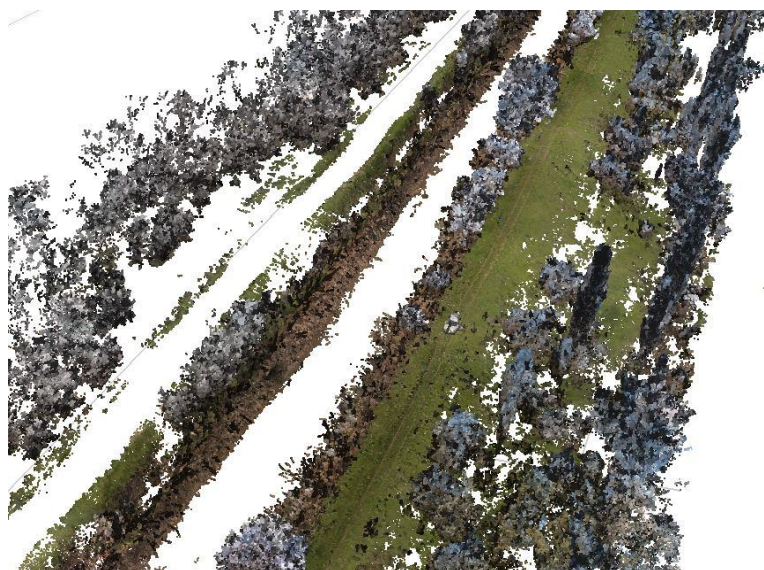
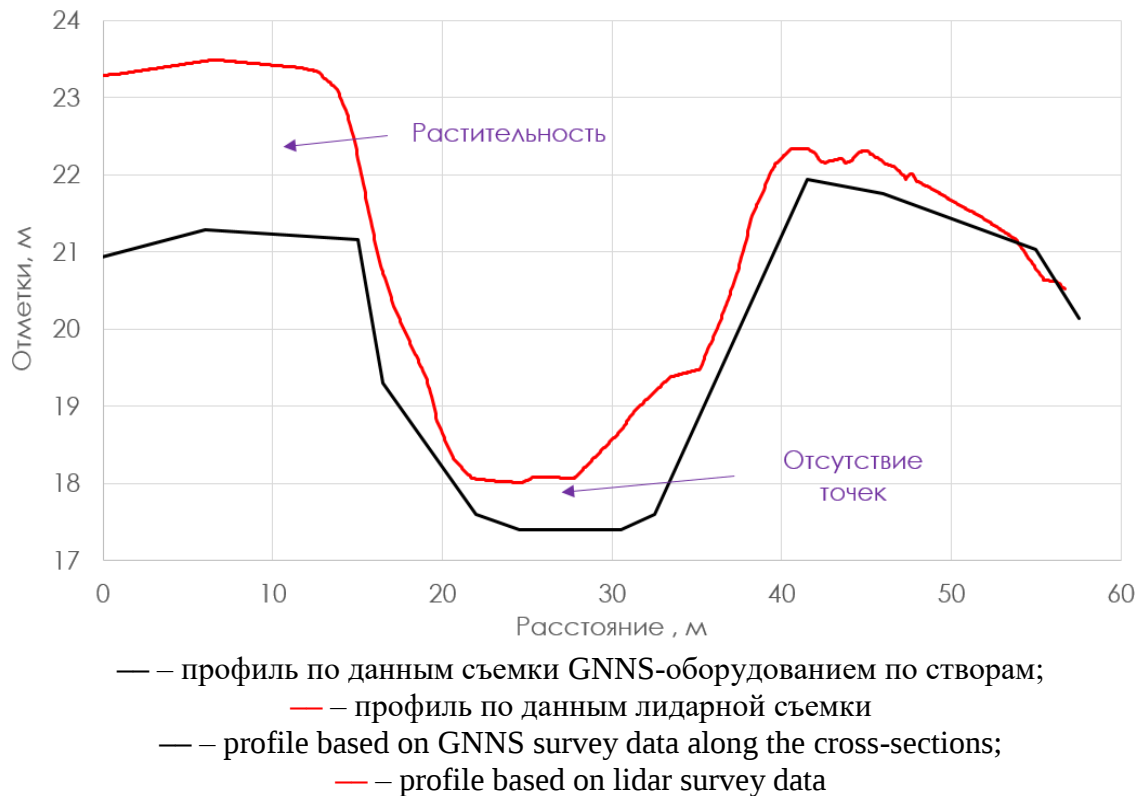


Рисунок 8 – Пример отсутствие отраженного сигнала от дна канала
Figure 8 – Example of absence of reflected signal from the channel bottom

Сравнение с GNSS-профилями показало расхождения в отметках (рисунок 9), что указывает не на ошибку сканирования, а на недостаточную плотность данных из-за условий съемки. Важно отметить: в процессе сканирования невозможно оперативно оценить полноту данных.



**Рисунок 9 – Сравнение результатов лидарной
съемки и GNSS-оборудованием**
Figure 9 – Comparison of lidar and GNSS survey results

Классификация точек является ключевым этапом обработки, позволяющим разделить точки по типам: земля, растительность, здания, дороги и др. Agisoft Metashape поддерживает автоматическую классификацию (рисунок 10), но она часто требует ручной коррекции.

Например, после автоматической обработки часть точек растительности ошибочно отнесена к классу «земля», что привело к искажению модели дна канала (рисунок 11a). Ручная коррекция позволила восстановить корректную геометрию (рисунок 11b).

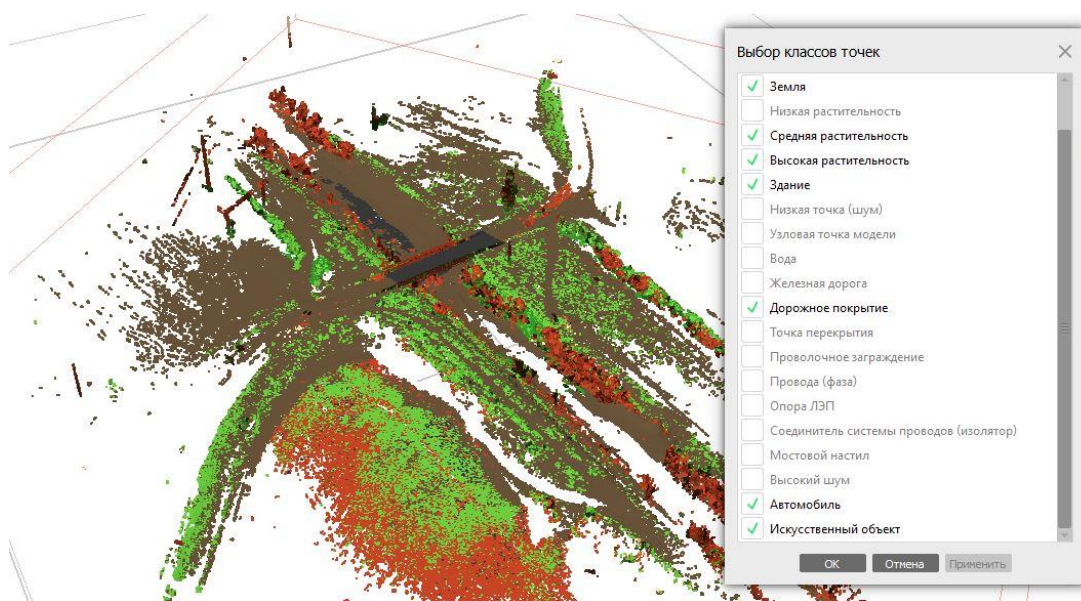
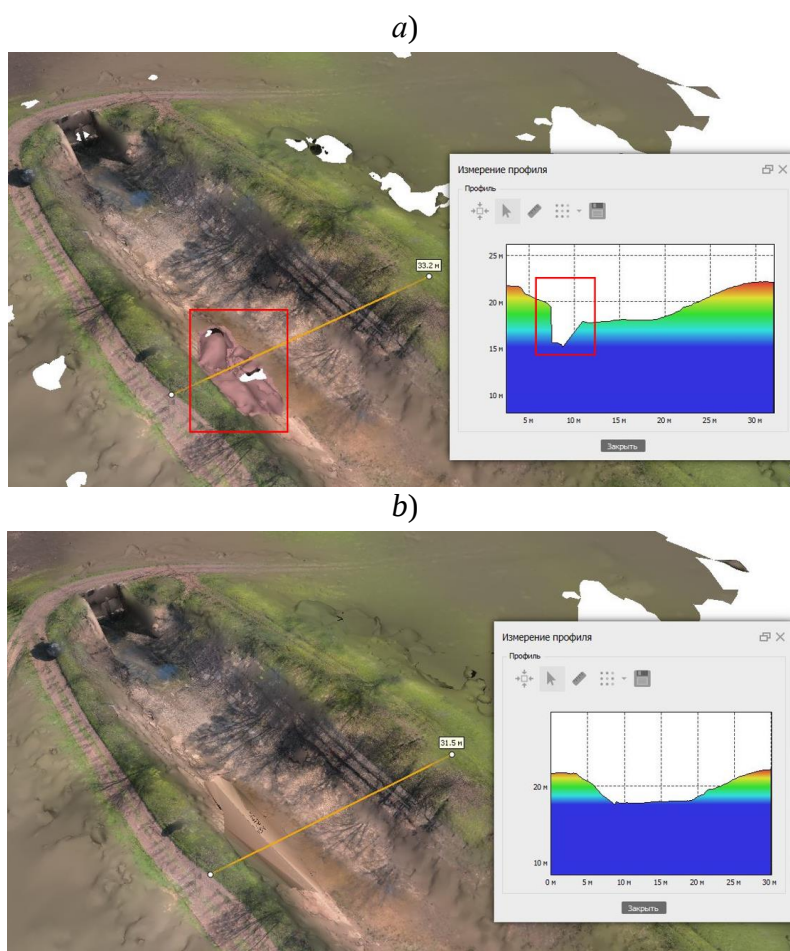


Рисунок 10 – Пример автоматической классификации точек
Figure 10 – Example of automatic classification of points



a) до коррекции; b) после ручной классификации
 a) before correction; b) after manual classification

Рисунок 11 – Модель дна канала
Figure 11 – Channel bottom model

Таким образом, ПО Agisoft Metashape Professional предоставляет гибкие инструменты для улучшения модели даже при недостатках полевой съемки. Итоговое качество модели зависит в первую очередь от квалификации специалиста.

Выводы. Применение фотограмметрии и мобильного лидарного сканирования при обследовании ГТС Азовской оросительной системы показало высокую информативность и практическую ценность методов. Данные методы получения сведений о техническом состоянии сооружений позволили получить широкий спектр ценной и практически значимой информации, а именно: получить точные размерные характеристики сооружений; визуализировать объекты, включая труднодоступные зоны; построить модели жестких конструкций (ж/б оголовков, щитов и затворов и др.); сформировать основу для BIM-моделирования и экспертных заключений; получить исходные данные для контроля объемов материалов, например, для проведения ремонта или реконструкции объекта).

В то же время выявлены ограничения: фотограмметрия чувствительна к освещению; лидарное сканирование уязвимо к растительности и требует тщательного планирования полевых работ; оба метода генерируют большие объемы данных и требуют значительных вычислительных ресурсов. Главное препятствие для широкого внедрения – отсутствие нормативной базы, регламентирующей точность и порядок выполнения работ. Без нее результаты не обладают юридической значимостью, несмотря на высокую техническую достоверность. Тем не менее, при грамотном сочетании цифровых и классических геодезических методов фотограмметрия и лидарное сканирование могут успешно применяться для мониторинга, проектирования и реконструкции гидромелиоративных объектов.

Список источников

1. Колесникова Ю. О. Создание векторных моделей объектов по результатам фотограмметрии и лазерного сканирования // Молодой ученый. 2021. № 51(393). С. 38–40. EDN: PCTRMW.

2. Зверьков М. С., Брыль С. В. Оценка мелиоративного состояния гидромелиоративной системы с использованием данных дистанционного зондирования Земли и беспилотного летательного аппарата // Природообустройство. 2021. № 2. С. 6–16. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-6-16. EDN: KKVFSQ.

3. Брыль С. В. К вопросу о цифровом моделировании мелиоративных объектов // International Agricultural Journal. 2021. Т. 64, № 6. DOI: 10.24412/2588-0209-2021-10440. EDN: WQDHRP.

4. Брусов В. А. Лазерное сканирование и фотограмметрия в реконструкции с применением BIM технологий // Вестник науки. 2025. Т. 2, № 5(86). С. 1030–1038. EDN: EMESFK.

5. Сташкунас Д. А., Варфоломеев А. Г. Применение технологий LIDAR, фотограмметрии и нейронных сетей для построения 3D карт // Решетневские чтения: материалы XXVII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, 8–10 нояб. 2023 г. В 2 ч. Ч. 2. Красноярск: Сибирский гос. ун-т науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева, 2023. С. 360–361. EDN: AZJTVL.

6. Астанова С. Ф. г. Физическая лаборатория: фотограмметрия, методы лидарного сканирования и создание виртуальной среды // Ceteris Paribus. 2025. № 4. С. 43–45. EDN: OYGDQN.

7. Use of scanning devices for object 3D reconstruction by photogrammetry and visualization in virtual reality / I. Drofova, W. Guo, H. Wang, M. Adamek // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2023. Vol. 12, no. 2. P. 868–881. DOI: 10.11591/eei.v12i2.4584. EDN: FJACUJ.

8. Видяев К. А., Крысин И. А., Чухраев И. В. Создание реалистичных текстур 3D моделей с помощью фотограмметрии // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2025. № 1(51). С. 6–10. EDN: ZXLNHO.

9. Comparison of TLS and SLAM technologies for 3D reconstruction of objects with different geometries / A. Szrek, K. Romańczukiewicz, P. Kujawa, P. Trybała // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1295, no. 1. 12012. DOI: 10.1088/1755-1315/1295/1/012012. EDN: LFQMPN.

10. Бобков В. А., Май В. П. О повышении эффективности решения 3D SLAM задачи по стереоизображениям // Информатика и системы управления. 2018. № 2(56). С. 14–23. DOI: 10.22250/isu.2018.56.14-23. EDN: XPBQIP.

11. Кобзева Е. А., Зуев Н. А. Особенности фотограмметрического метода при проведении кадастровых работ в населенных пунктах // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 2, № 3. С. 118–124. EDN: YLHRAT.

References

1. Kolesnikova Yu.O., 2021. *Sozdanie vektornykh modeley ob"ektov po rezul'tatam fotogrammetrii i lazernogo skanirovaniya* [Creation of vector models of objects based on the results of photogrammetry and laser scanning]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], no. 51(393), pp. 38-40, EDN: PCTRMW. (In Russian).

2. Zverkov M.S., Bryl S.V., 2021. *Otsenka meliorativnogo sostoyaniya gidromeliorativnoy sistemy s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli i bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Assessment of the land reclamation condition of the irrigation and drainage system using data of the earth remote sensing data and drone]. *Prirodobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 2, pp. 6-16, DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-6-16, EDN: KKVFSQ. (In Russian).

3. Bryl S.V., 2021. *K voprosu o tsifrovom modelirovanii meliorativnykh ob"ektov* [On the issue of digital modeling of reclamation systems and facilities]. *International Agricultural Journal*, vol. 64, no. 6, DOI: 10.24412/2588-0209-2021-10440, EDN: WQDHRP. (In Russian).

4. Brusov V.A., 2025. *Lazernoe skanirovanie i fotogrammetriya v rekonstruktsii s primeneniem BIM tekhnologiy* [Laser scanning and photogrammetry in reconstruction using BIM technologies]. *Vestnik nauki* [Science Bulletin], vol. 2, no. 5(86), pp. 1030-1038, EDN: EMESFK.

5. Stashkunas D.A., Varfolomeev A.G., 2023. *Primenenie tekhnologiy LIDAR, fotogrammetrii i neyronnykh setey dlya postroeniya 3D kart* [Application of LIDAR, photogrammetry, and neural networks for constructing 3D maps]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XXVII Mezhdunarodnoy nauchno-prakt. konferentsii, posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva. V 2 ch. Ch. 2* [Reshetnev Readings: Proceed. of the XXVII International Scientific Practical Conf., Dedicated to the Memory of the General Designer of Rocket and Space Systems, Academician M. F. Reshetnev. In 2 parts. Part 2]. Krasnoyarsk, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, pp. 360-361, EDN: AZJTVL. (In Russian).

6. Astanova S.F., 2025. *Fizicheskaya laboratoriya: fotogrammetriya, metody lidarnogo skanirovaniya i sozдание virtual'noy sredy* [Developing physics Laboratory: photogrammetry, lidar scanning methods, and the creation of a virtual environment]. *Ceteris Paribus*, no. 4, pp. 43-45, EDN: OYGDQN. (In Russian).

7. Drofova I., Guo W., Wang H., Adamek M., 2023. [Use of scanning devices for object 3D reconstruction by photogrammetry and visualization in virtual reality. *Bullet. of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 868-881, DOI: 10.11591/eei.v12i2.4584, EDN: FJACUJ.

8. Vidyaev K.A., Krysin I.A., Chukhraev I.V., 2025. *Sozдание realistichnykh tekstur 3D modeley s pomoshch'yu fotogrammetrii* [Creating realistic textures of 3D models using photogrammetry]. *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovanie* [Electronic Journal: Science, Technology and Education], no. 1(51), pp. 6-10, EDN: ZXLHNO. (In Russian).

9. Szrek A., Romańczukiewicz K., Kujawa P., Trybała P., 2024. Comparison of TLS and SLAM technologies for 3D reconstruction of objects with different geometries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1295, no. 1, 012012, DOI: 10.1088/1755-1315/1295/1/012012, EDN: LFQMPN.

10. Bobkov V.A., May V.P., 2018. *O povyshenii effektivnosti resheniya 3D SLAM zadachi po stereoizobrazheniyam* [On enhancement the solution efficiency of the 3d slam problem on stereo images]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Computer Science and Control Systems], no. 2(56), pp. 14-23, DOI: 10.22250/isu.2018.56.14-23, EDN: XPBQIP. (In Russian).

11. Kobzeva E.A., Zuev N.A., 2018. *Osobennosti fotogrammetricheskogo metoda pri provedenii kadastrykh rabot v naselennykh punktakh* [Features of the photogrammetric method in the land registry]. *Interesko Geo-Sibir'* [Inter Expo Geo-Siberia], vol. 2, no. 3, pp. 118-124, EDN: YLHRAT. (In Russian).

Информация об авторах

Т. С. Пономаренко – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, ponomarenko.taisya@yandex.ru, AuthorID: 619318, ORCID: 0000-0002-2003-1686;

А. Н. Рыжаков – научный сотрудник, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, hrust.89@bk.ru, AuthorID: 784962, ORCID: 0000-0002-9268-255X.

Information about the authors

T. S. Ponomarenko – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, ponomarenko.taisya@yandex.ru, AuthorID: 619318, ORCID: 0000-0002-2003-1686;

A. N. Ryzhakov – Researcher; Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, xrust.89@bk.ru, AuthorID: 784962, ORCID: 0000-0002-9268-255X.

Вклад авторов: Т. С. Пономаренко произвела обзор источников, собрала и обработала данные, написала статью. А. Н. Рыжаков произвел обзор источников, собрал и обработал данные, проанализировал результаты, участвовал в написании статьи.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: T. S. Ponomarenko reviewed the sources, collected and processed the data, and wrote the article. A. N. Ryzhakov reviewed the sources, collected and processed the data, analyzed the results, and contributed to the article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.01.2026; одобрена после рецензирования 19.02.2026; принята к публикации 18.08.2026.

The article was submitted 26.01.2026; approved after reviewing 19.02.2026; accepted for publication 18.08.2026.