

УДК 681.786.23 : 725.945.025.4

В. А. Парфенов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

О. В. Франк-Каменецкая

Санкт-Петербургский государственный университет

И. А. Леонова

ООО «Индустрия туризма» (Санкт-Петербург)

С. Л. Мошкина

ООО «Диалог. Информационные Технологии» (Санкт-Петербург)

Е. Е. Мошников

Санкт-Петербургская академия постдипломного педагогического образования

Применение лазерного 3D-сканирования для мониторинга скульптурных памятников

Исследуются возможности применения технологии лазерного 3D-сканирования для мониторинга состояния сохранности памятников истории и культуры, экспонируемых на открытом воздухе. Проведены экспериментальные исследования по отработке технологии мониторинга скульптурных памятников из камня. Объектом исследования служила мраморная скульптура плакальщицы на памятнике А. Я. Охотникову в некрополе XVIII в. Александро-Невской лавры в Санкт-Петербурге. Для сканирования был использован сканер Konica Minolta Vi-9i, обеспечивающий точность измерений рельефа исследуемой поверхности на уровне 50...100 мкм. Полученный набор сканов обрабатывали при помощи специализированной компьютерной программы RapidForm XOR3. Сканирование скульптуры проводилось дважды: до и после завершения плановых работ по ее реставрации, что позволило смоделировать изменение микрорельефа ее поверхности. Проведенные исследования показали, что лазерное 3D-сканирование может быть рекомендовано для практической музейной работы как высокоточный и информативный метод мониторинга скульптурных памятников. Одним из самых точных критериев изменения состояния сохранности памятников в результате данного вида мониторинга является определение площади разрушений их поверхности. Еще одним критерием, по которому также можно оценивать степень разрушений памятника в течение контрольного интервала времени, является длина имеющихся на его поверхности трещин и сколов.

Лазерное 3D-сканирование, компьютерная 3D-модель, мониторинг, скульптура из мрамора, памятники истории и культуры

Из-за резко усилившегося в последнее десятилетие воздействия антропогенных факторов окружающей среды на состояние сохранности экстерьерных (т. е. экспонируемых на открытом воздухе) памятников истории и культуры, значительно возросла скорость их разрушения. Сегодняшние темпы эрозии каменных памятников стали столь велики, что за 20–30 лет с ними происходят изменения, сопоставимые по своим масштабам с процессами разрушений за предшествующие 2–3 столетия. В данной ситуации на повестке остро встает вопрос о необходимости проведения регулярного мониторинга памятников [1]–[4]. В первую очередь это относится к скульптурам и барельефам из мрамора и известняка, что связано с физико-химическими свойствами материалов.

Традиционным подходом к мониторингу состояния памятников является их визуальное обследование в сочетании с фотофиксацией. Однако в последние годы в арсенале специалистов появились новые методы диагностики: картографирование и квалитетрический метод оценки форм разрушения материала памятников, а также ультразвуковое обследование и спектральный анализ [4]. Еще одним перспективным методом мониторинга скульптурных памятников является лазерное 3D-сканирование. В настоящее время эта технология все более активно используется для документирования объектов культурно-исторического наследия [5]–[8]. Интерес к 3D-сканированию связан с тем, что получаемые в результате сканирования компьютерные 3D-модели па-

мятников дают высокоточную информацию об их размерах и геометрической форме. Это позволяет не только документировать состояние памятников, но и проводить количественные оценки степени повреждений их поверхности (например, измерять площадь гипсовых корок и биологических обрастаний, глубину и ширину трещин и т. д.) и отслеживать динамику разрушительных процессов путем периодического повторения операции сканирования наиболее проблемных участков. В этом и заключается предлагаемый авторами статьи новый для отечественной практики музейной работы подход к мониторингу экстерьерных скульптурных памятников.

Следует заметить, что, несмотря на потенциальную привлекательность и широкое применение лазерных технологий в целом в сохранении культурно-исторического наследия за рубежом, метод 3D-сканирования пока не получил там широкого применения для мониторинга памятников. Из научной литературы известны лишь единичные примеры его практической реализации [9], [10]. С учетом этого обстоятельства, проведенные исследования и их результаты имеют научную новизну и высокую практическую значимость.

Экспериментальные исследования. Начало исследований авторов статьи по отработке методики применения лазерного 3D-сканирования для мониторинга экстерьерных скульптурных памятников относится к середине 2010 г., когда было проведено сканирование фигуры мраморной скульптуры плакальщицы на памятнике А. Я. Охотникову в некрополе XVIII в. Александро-Невской лавры в Санкт-Петербурге (рис. 1).



Рис. 1



Рис. 2

В работе был использован сканер Konica Minolta Vi-9i («Konica Minolta», Япония), обеспечивающий точность измерений рельефа исследуемой поверхности на уровне 50...100 мкм. Сканирование выполняли в «полевых условиях» – непосредственно в некрополе XVIII в. Съемка осуществлялась с расстояния около 1 м от поверхности памятника (рис. 2).

Полученный набор сканов затем обрабатывали в лаборатории при помощи специализированной компьютерной программы RapidForm XOR3 (разработчик «Inus Technology», Южная Корея). В результате была создана высокоточная компьютерная 3D-модель данной скульптуры (рис. 3).

После этого с помощью той же самой компьютерной программы в полученной 3D-модели были идентифицированы области поверхности скульптуры, соответствующие различным формам разрушения мрамора (черные гипсовые корки, трещины, царапины и др.) и оценена их пло-



Рис. 3

щадь. По удачному стечению обстоятельств в 2012 г. реставрационная компания ООО «РМ Наследие» по заданию Санкт-Петербургского музея городской скульптуры проводила плановую реставрацию исследуемого памятника, в ходе которой с поверхности плакальщицы были удалены гипсовые корки и проведена заделка трещин. Это дало возможность провести повторное сканирование проблемных участков поверхности плакальщицы с использованием того же самого сканера Konica Minolta Vi-9i. В результате сравнения 3D-моделей, полученных в 2010 и 2012 гг., был проведен анализ изменения состояния поверхности скульптуры. Такой анализ позволил оценить эффективность проведенных реставрационных работ и сделать выводы о перспективности применения лазерного сканирования при мониторинге скульптурных памятников.

Для количественной оценки погрешностей при создании 3D-моделей памятников была предложена методика сравнительного анализа точности их сборки из отдельных сканов, полученных в процессе сканирования. Суть этой методики заключается в оценке отличия друг от друга моделей одного и того же объекта, собранных разными операторами, а также одним и тем же и разными операторами, но с помощью различных компьютерных программ. Последовательность действий при проведении сравнительного анализа была такова: 1) создание 3D-моделей объекта различными методами (в разных программах и разными операторами); 2) наложение 3D-моделей друг на друга; 3) фиксация отклонения сеток полигонов моделей и измерение их среднеарифметического и среднеквадратичного отклонений. Указанный сравнительный анализ осуществлялся

при сборке 3D-моделей различных скульптур, в частности, плакальщицы на памятнике А. Я. Охотникову. Для сборки его моделей использовались следующие специализированные компьютерные программы, предназначенные для обработки данных лазерного сканирования:

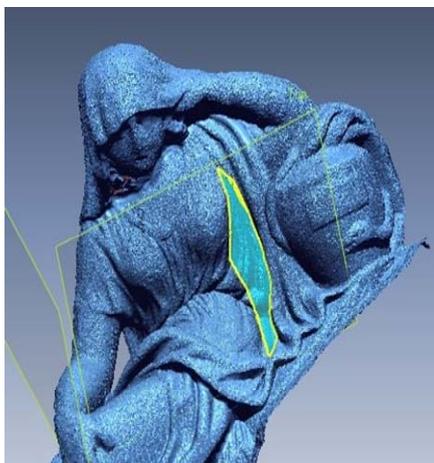
1. Polygon Editing Tool (разработчик «Konica Minolta»).

2. RapidForm XOR3.

3. Geomagic Studio (разработчик «Inus Technology», Южная Корея).

При этом использовали как «ручную» сборку (самим оператором), так и сборку в автоматическом режиме, которая осуществлялась самой программой (при минимальном контроле со стороны оператора).

Полученные 3D-модели скульптуры попарно загружались в программу Geomagic Studio, которая позволяет накладывать 3D-модели друг на друга и оценивать степень различия между ними. Наложение моделей осуществлялось посредством поиска так называемых характеристических (контрольных) точек [11]. После взаимного совмещения 3D-моделей фиксировалось их отклонение по всей поверхности объекта и отклонение сеток полигонов в каждой отдельно взятой точке. Одним из важных достоинств программы Geomagic при проведении сравнительного анализа 3D-моделей является то, что она позволяет визуализировать различие поверхностей наложенных друг на друга моделей с помощью специальной цветовой гаммы. Так, участки поверхности, которые имеют самое большое отклонение сеток полигонов (в интервале около 1...5 мм), программа отображает красным цветом, отклонения менее 0.5 мкм окрашиваются в желто-оранжевые цвета, а участки с взаимным отклонением менее 0.1 мм окрашиваются в зеленый цвет, и т. д.



а



б

Рис. 4

Таблица 1

Форма разрушения	Площадь разрушения, см ²
Трещина 1 (левое плечо/спина)	16.8
Трещина 2 (драпировка на левой ноге)	3.09
Царапина 1 (на локте правой руки)	0.87
Царапина 2 (на правом колене на драпировке)	0.6
Царапина 3 (на правой ноге на драпировке)	1.53
Царапина 4 (в складках драпировки на правом бедре)	1.16
Царапина 5 (в складках драпировки на правом бедре)	0.38
Первичная гипсовая корка в области под левой подмышкой в складках драпировки	60.8

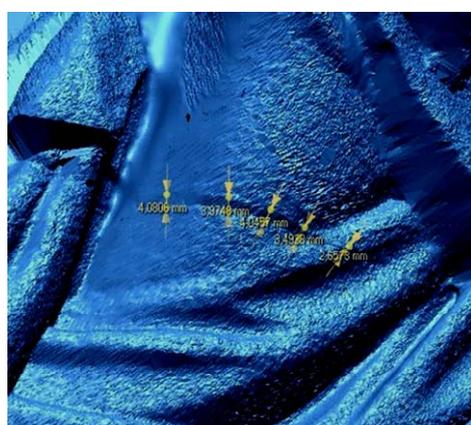
Результаты исследования и их обсуждение. В 3D-модели, полученной при сканировании скульптуры плакальщицы на памятнике А. Я. Охотникову до реставрации, были околочены различные формы ее разрушения (рис. 4 и 5). В частности, на рис. 4, *а* показана область черной гипсовой корки в складках драпировки плакальщицы на левом боку и та же самая область в ее изображении на фотографии (рис. 4, *б*). Аналогичные данные представлены на рис. 5: *а* – изображение трещины на поверхности мрамора в 3D-модели; *б* – та же самая трещина в ее фотографическом изображении.

С помощью математического обсчета 3D-модели в той же программе RapidForm XOR3 была проведена оценка площади поверхности скульптуры, соответствующей этим разрушениям. Как следует из данных, представленных в табл. 1, количественная оценка развития отдельных видов разрушений мраморной скульптуры с помощью

лазерного сканирования может быть выполнена с высокой точностью. В частности, измерение длины и средней ширины поверхностных трещин можно проводить с точностью до долей миллиметра, а площади гипсовых корок – до десятых долей сантиметров квадратных.

Сравнение 3D-моделей скульптуры, полученных до и после реставрации, выявили существенное изменение состояния ее поверхности (табл. 2 и рис. 6). Так, на рис. 6, *а* область, выделенная прямоугольником, показывает глубокую трещину в модели 2010 г.; на рис. 6, *б* – ее отсутствие в модели 2012 г.

Полученные результаты подтвердили принципиальную возможность проведения мониторинга скульптурных памятников с помощью лазерного 3D-сканирования. Вместе с тем, поскольку изменение состояния поверхности экстерьерных скульптур может быть незначительным даже на протяжении долгого времени (нескольких лет), возникает вопрос о предельной точности такого мониторинга в краткосрочной перспективе. Постановка такого вопроса связана с тем, что существуют источники погрешности измерений в процессе сканирования, особенно в «полевых» условиях [12]–[14]. Кроме того, из-за ошибок на стадии обработки данных сканирования текстура поверхности памятника в 3D-модели может отличаться от реальной текстуры поверхности самого памятника. Это связано с тем, что точность создания 3D-моделей во многом зависит от функциональных свойств используемого программного обеспечения и квалификации программиста. К сожалению, эти вопросы почти не рассматриваются в научной литературе, но были подробно исследованы в работах одного из авторов статьи. В частности, в [15] исследовалась точность создания 3D-моделей объектов, представляющих



а



б

Рис. 5

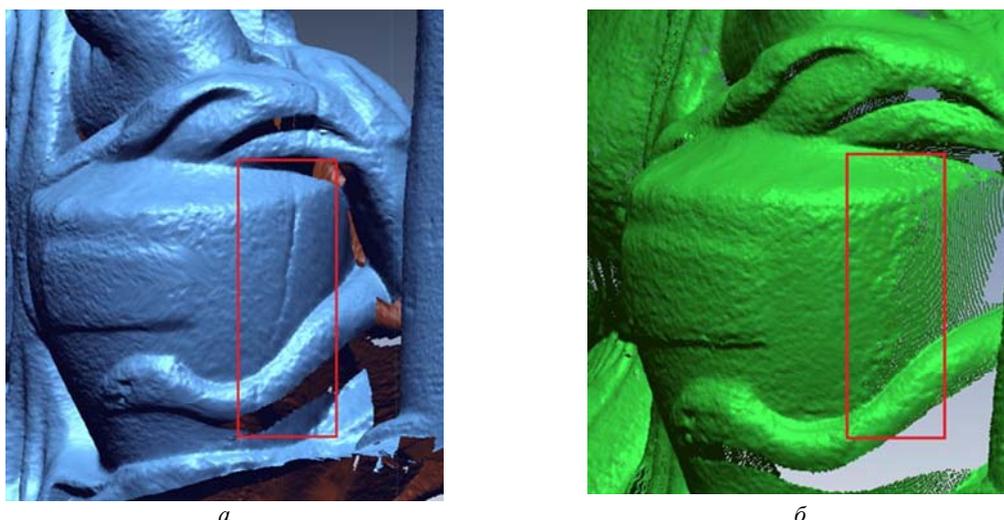


Рис. 6

Таблица 2

Форма разрушения	Площадь разрушения, см ²	
	до реставрации	после реставрации
Трещина 1 (правый локоть)	7.74	Нет
Трещина (на урне)	7.03	3.22 (остался шов)
Гипсовая корка (на шее)	4.21	Нет
Царапина 1 (на правом колене на драпировке)	0.6	
Царапина 3 (на правой ноге на драпировке)	1.53	

собой геометрические «примитивы» (имеются в виду предметы, имеющие предельно простую геометрическую форму поверхности, например полированные металлические цилиндры). Было показано, что форма их поверхности в 3D-модели может отличаться от формы поверхности самих объектов. И хотя при работе со сканерами Konica Minolta Vi-910 и Konica Minolta Vi-9i среднее арифметическое значение отклонения исходной и реконструированной поверхностей оказалось невелико (оно составляет около 40...50 мкм, что сопоставимо с паспортной точностью измерений, обеспечиваемой этими сканерами), такое утверждение справедливо лишь для малогабаритных объектов (размеры цилиндров, использованных в [15], составляли 3 × 20 см). В случае же предметов более сложной формы и больших габаритов такое различие может быть значительно выше.

В качестве примера на рис. 7 показан результат наложения 3D-моделей плакальщицы, собранный одним и тем же оператором в двух раз-

личных программах – Polygon Editing Tool и RapidForm XOR3.

Оказалось, что максимальное значение среднеарифметического отклонения поверхности фигуры плакальщицы на памятнике А. Я. Охотникову (при использовании различных программ и методов сборки) на отдельных участках для различных 3D-моделей составило 4.9 мм, а значение среднеквадратичного отклонения варьировалось в пределах 0.2...1 мм. При этом отличие площадей скульптуры (по всей поверхности) составляло не более 0.003 м². Следует заметить, что наибольшее различие поверхностей скульптуры наблюдалось при использовании автоматической сборки 3D-моделей, а при работе в «ручном» режиме разброс значения среднеарифметического отклонения поверхностей не превышал 1 мм.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать ряд важных выводов. Главный из них состоит в том, что лазерное 3D-сканирование может быть рекомендовано для практической музейной работы как высокоточный и информативный метод мониторинга скульптурных памятников. Одним из самых точных критериев изменения состояния сохранности памятников, которое может быть выявлено в ходе такого мониторинга, является определение площади разрушений (площади выкрашивания и других видов эрозии каменного материала, площади обогащенной гипсом патины, площади биопоражений поверхности и др.). Еще одним критерием, по которому также можно оценивать степень разрушения памятника в течение контрольного интервала времени, является длина имеющихся на его поверхности трещин и сколов. Что касается глубины трещин и изменения степени шероховатости эродирован-

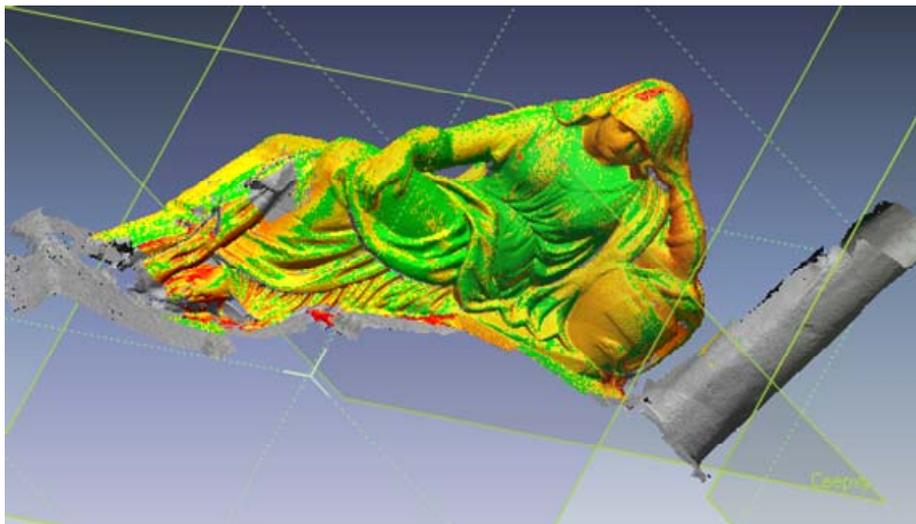


Рис. 7

ной поверхности, то при определении значений этих параметров могут возникать значительные ошибки, связанные с точностью создания 3D-моделей. Поэтому контроль указанных параметров имеет субъективный характер и не может быть рекомендован как обязательная процедура при проведении мониторинга.

Важный практический результат работы в целом, который нужно принимать в расчет при проведении работ по мониторингу скульптурных памятников с использованием 3D-сканеров, состоит в том, что точность мониторинга строго зависит от точности самого сканирования и точности создания компьютерных 3D-моделей. Для обеспечения максимальной точности мониторинга следует использовать сканеры преимущественно триангуляционного типа с точностью измерений не менее 100 мкм. Кроме того, при компьютерной обработке данных, полученных в ходе сканирования, в процессе работы необходимо полностью

исключать использование процедур автоматического совмещения сканов.

Таким образом, лазерное 3D-сканирование является высокоэффективным методом мониторинга экстерьерных скульптурных памятников, но при его проведении необходимо очень тщательно выполнять работы по сканированию и компьютерному моделированию. Это требует использования высокоточных сканеров и привлечения к выполнению этих работ высококвалифицированных специалистов, имеющих значительный опыт работы по сканированию скульптур и малых архитектурных форм.

Авторы выражают благодарность А. Н. Герашенко и В. О. Тишкину, принимавшим участие в работах по сканированию и созданию 3D-моделей. Отдельных слов благодарности заслуживает Г. Л. Кравец – за предоставленное для работ по лазерному 3D-сканированию оборудование и поддержку проведенных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скульптура XVIII–XIX веков на открытом воздухе. Проблемы сохранения и экспонирования / под ред. Н. Н. Ефремовой, Д. В. Осипова, В. В. Рытиковой, В. Н. Тимофеева, О. В. Франк-Каменецкой; Государственный музей городской скульптуры. СПб., 2010. 84 с.
2. Музей под открытым небом. Проблемы сохранения памятников из камня и бронзы / под ред. Д. Ю. Власова, В. В. Рытиковой, В. Н. Тимофеева, О. В. Франк-Каменецкой; Государственный музей городской скульптуры. СПб., 2012. 179 с.
3. Музей под открытым небом. Современные подходы к сохранению скульптуры / под ред. В. В. Рытиковой, О. В. Франк-Каменецкой, Д. Ю. Власова. Воронеж: ООО «МС», 2015. 160 с.
4. Памятники музейных некрополей Санкт-Петербурга. Бытование, материалы, диагностика сохран-

- ности / под ред. Д. Ю. Власова, В. В. Рытиковой, О. В. Франк-Каменецкой. СПб.: Изд-во ВВМ, 2016. 171 с.
5. Portable digital 3-D imaging system for remote sites / J.-A. Beraldin, F. Blais, L. Cournoyer et al. // Proc. of IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems. 1998. Vol. 5. P. V-488–V-493.
6. High-resolution 3D digital models of artworks / R. Fontana, M. C. Gambino, M. Greco, E. Pampaloni, L. Pezzati, R. Scopigno // Proc. of SPIE. 2003. Vol. 5146. P. 34–43.
7. Фрейдин А. Я., Парфенов В. А. Трехмерное лазерное сканирование и его применение для съемки архитектурных сооружений и реставрации памятников // Оптик. журн. 2007. Т. 74, № 8. С. 44–49.
8. Barmpoutis A., Bozia E., Fortuna D. Interactive 3D Digitization, Retrieval, and Analysis of Ancient Sculptures,

Using Infrared Depth Sensors for Mobile Devices. In: Antona M., Stephanidis C. (eds.) Universal Access in Human-Computer Interaction. Access to the Human Environment and Culture. UAHCI 2015 // Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9178. P. 3–11.

9. Boochs F., Huxhagen U., Kraus K. Potential of high-precision measuring techniques for the monitoring of surfaces from heritage objects / In situ monitoring of monumental surfaces. P. Tiano and C. Pardini (eds.) // Proc. of the Intern. Workshop SMW08, Sesto Fiorentino (FI), Italy, 2008. P. 87–96.

10. Kottke J. An investigation of quantifying and monitoring stone surface deterioration using three dimensional laser scanning: Thesis of Master of Science. Pennsylvania: Pennsylvania University, 2009.

11. Парфенов В. А. Методические указания по лазерному 3D-сканированию скульптурных памятников. СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2017. 28 с.

12. Boehle W., Bordas M. V., Marbs A. Investigating Laser Scanner Accuracy // Proc. of XIXth CIPA Symp. Antalya, Turke, 2003.

13. Clark J., Robson S. Accuracy of measurements made with CYRAX 2500 laser scanner against surfaces of known colour // The Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004. Vol. XXXV, Commission IV. Pt. B4. P. 1031–1037.

14. Kersten T. P., Sternberg H., Mechelke K. Investigations into the accuracy behaviour of the terrestrial laser scanning system Mensi GS100 / A. Gran, H. Kahmen (eds.) // Proc. of Optical 3-D Measurement Techniques VII. Vienna, Austria, 2005. Vol. 1. P. 122–131.

15. Тишкин В. О., Парфенов В. А. Точность создания электронных 3-D-моделей при трехмерном лазерном сканировании // Оптич. журн. 2012. Т. 79, № 7. С. 84–89.

V. A. Parfenov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

O. V. Frank-Kamenetskaya

Saint Petersburg State University

I. A. Leonova

«Industry of tourism», Ltd. (Saint Petersburg)

S. L. Moshkina

«Dialog. Information technologies», Ltd. (Saint Petersburg)

E. E. Moshnikov

Saint Petersburg Academy of Postgraduate Pedagogical Education

APPLICATION OF LASER 3D SCANNING FOR MONITORING SCULPTURAL MONUMENTS

The paper is devoted to the investigation of the possibility of applying laser 3D scanning technology for monitoring the state of preservation of historical and cultural monuments exhibited in the open air. The experimental studies on the development of technology for monitoring sculptural monuments of stone have been carried out in the work. The object of the study was the marble sculpture of the mourner at the monument to A. Ya. Okhotnikov in the Necropolis of the XVIII century of the Alexander Nevsky Monastery in St. Petersburg. For scanning, the Konica Minolta Vi-9i scanner was used, which ensures the accuracy of measurements of the relief of the investigated surface at a level of 50...100 μm. The resulting set of scans was processed using a specialized computer program RapidForm XOR3. The sculpture was scanned twice: before and after the completion of planned works for its restoration, which allowed modeling the change in the microrelief of its surface. Studies have shown that laser 3D scanning can be recommended for practical museum work as a highly accurate and informative method of monitoring sculptural monuments. One of the most accurate criteria for changing the state of preservation of monuments as a result of this type of monitoring is the determination of the area of destruction of their surface. Another criterion by which it is also possible to assess the degree of destruction of the monument during the control interval of time is the length of cracks and chips on its surface.

Laser 3D-scanning, computer 3D-model, monitoring, sculpture from marble, historical and cultural monuments