



УДК 681.7.069.24:620.193.82:069.44

А. Н. Геращенко

Тель-Авивский университет (г. Тель-Авив, Израиль)

В. А. Парфенов

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

Удаление биологических загрязнений с поверхности памятников из камня при помощи лазерной обработки (примеры практических реставрационных работ с использованием лазера)¹

Приводятся результаты практических работ по реставрации скульптурных памятников из мрамора, проведенных в Санкт-Петербурге с помощью импульсного Nd:YAG-лазера ($\lambda = 1.064$ мкм). Показано, что наряду с другими видами загрязнений, характерными для экстерьерных каменных памятников, с помощью лазерной обработки с поверхности скульптур были удалены биологические пленки, которые состояли из колоний микроскопических грибов и накипных лишайников.

Биологические поражения памятников, микроскопические грибы, лишайники, лазерная очистка, реставрация

Одной из главных причин разрушения исторических памятников из камня является появление на их поверхности биологических загрязнений [1]. Как было показано в [2]–[4] лазерная очистка может рассматриваться как перспективный метод борьбы с микроорганизмами-биодеструкторами.

Авторами статьи ранее были проведены эксперименты по обработке микроскопических грибов и водорослей при помощи импульсного Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм с целью разработки лазерной технологии защиты памятников от биологических разрушений. Результаты этих исследований, описанные в [2]–[4], показали возможность полного удаления и/или инактивации данных микроорганизмов под воздействием лазерного излучения. В данной статье приведены примеры некоторых практических работ по реставрации скульптурных памятников из мрамора, имеющих биологические загрязнения. Эти работы по лазерной очистке были проведены авторами статьи в Санкт-Петербурге.

Очистка мраморной скульптуры Летнего сада. Летний сад с его уникальной коллекцией западноевропейских скульптур XVII–XVIII вв. является частью Государственного Русского музея (ГРМ). До начала проекта по реконструкции Летнего сада (2010) в нем экспонировались подлинники скульптуры, которые позднее были заменены на копии из полимерных материалов-камнезаменителей. Для оригинальной скульптуры Летнего сада были характерны все виды повреждений, типичные для экстерьерных скульптурных памятников из камня: общее стойкое поверхностное загрязнение; наличие нескольких слоев восковых и полимерных покрытий; деструкция поверхности мрамора (трещиноватость, зернистость, слоистость); отсутствие отдельных фрагментов скульптуры; изменение декоративных свойств старых реставрационных восполнений, а также (что было особенно актуально для проводимых авторами исследований) наличие биогенных загрязнений.

¹ Окончание. Начало в № 6, 9, 10 за 2016 г.

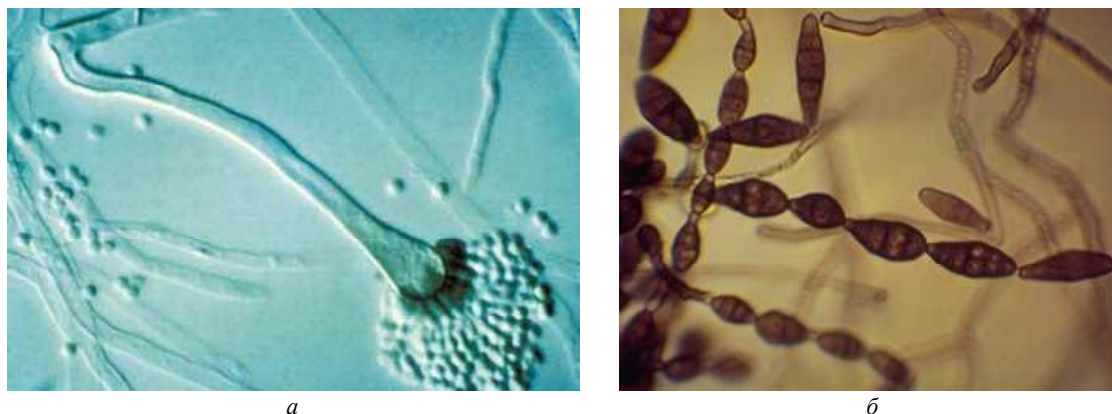


Рис. 1

Заметим, что при проведении реставрационных работ с поверхности скульптурного памятника должны быть удалены все виды загрязнений, независимо от их вида. Поэтому в задачу реставраторов входит очистка памятника от биогенных поражений наряду с другими загрязнениями. С учетом результатов исследований по очистке мрамора [5]–[7], а также по удалению микромицетов и водорослей, описанных в [3], [4], в ходе работ по реставрации скульптур Летнего сада был использован импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер, имеющий следующие выходные параметры: длина волны – 1064 нм, длительность импульса – 30...110 мкс, диапазон регулировки уровня энергии импульсов – 0.2...2 Дж, частота повторения импульсов – 1...30 Гц.

Одной из первых скульптур, очищенных с помощью лазера, была скульптура «Церера», авторство которой приписывается фламандскому скульптору Томасу Квеллинусу (Thomas Quellinus). Эта статуя датируется концом XVII в. и относится к числу наиболее значимых произведений из коллекции Летнего сада.

Для удаления загрязнений «Цереры», а позднее и многих других скульптур Летнего сада использовалась влажная лазерная очистка (в процессе лазерной обработки на поверхность мрамора при помощи кисти наносился тонкий слой дистиллированной воды). В большинстве случаев плотность

энергии лазерного излучения варьировалась в диапазоне 25...50 Дж/см², однако при удалении очень стойких загрязнений плотность энергии приходилось увеличивать до 50...60 Дж/см².

В ходе реставрационных работ большое внимание уделялось изучению возможности использования лазерной обработки для удаления биогенных загрязнений. Наиболее характерными видами биопоражений мрамора в Летнем саду являются микроскопические грибы видов *Acremonium*, *Alternaria*, *Aureobasidium*, *Cladosporium*, *Coniothyrium*, *Exophiala*, *Fusarium*, *Phoma* и *Torula* (рис. 1. Микроскопические грибы, характерные для поражений скульптуры Летнего сада: *a* – мицелий *Cladosporium*; *б* – конидиеносец *Aspergillus*).

Помимо гипсовых корок, сажепылевых и биогенных загрязнений в ходе реставрации скульптур Летнего сада проводилось также удаление следов старых реставрационных материалов. На поверхности многих скульптур встречались трудноудаляемые загрязнения от полимерных материалов. В их числе были, в частности, мастиковки из полибутилметакрилата (ПБМА), кремнийорганических соединений, эпоксидных смол, а также цемента. Однако, как показали результаты работы, все перечисленные виды загрязнений могут быть удалены при помощи лазера.

В табл. 1 приведены выходные параметры лазера, использованные для удаления различных видов

Таблица 1

Виды загрязнений скульптуры Летнего сада и параметры лазера, использованные для их удаления

Вид загрязнения	Плотность энергии, Дж/см ²	Частота повторения импульсов, Гц
Гипсовые корки	20...50	10...15
Биогенные загрязнения	13...50	5...10
Полибутилметакрилат (ПБМА)	25...50	10
Кремнийорганические соединения	30...35	10
Эпоксидная смола	20...35	10
Цемент	12...25	10

загрязнений с поверхности мраморных скульптур Летнего сада в процессе их реставрации.

По мнению специалистов самого Русского музея и Комитета государственной инспекции и охраны памятников Правительства Санкт-Петербурга (КГИОП), курировавших работы по реставрации скульптур Летнего сада, результаты выполненных при помощи лазера работ полностью удовлетворяли требованиям музейной реставрации, а именно была выполнена деликатная расчистка без ущерба для поверхности, сохраняющая патину времени.

Вывод об эффективности и безопасности лазерной очистки «Цереры» был сделан в результате тщательного анализа экспериментальных данных, полученных методами высокоразрешающей оптической и сканирующей электронной микроскопии, петрографического, микронзондового, а также микологического анализа поверхности мрамора до и после лазерной обработки. В качестве примера на рис. 2 приведено изображение поверхности мрамора с характерным биогенным поражением до (слева) и после (справа) лазерной обработки, полученное с помощью оптического стереомикроскопа. На изображении отчетливо видно, что структура зерен кальцита после лазерной обработки не изменилась, но при этом полностью удалены следы биологических поражений (участки с биопоражениями имеют темный цвет и хорошо видны в левой части фотографии). Вместе с тем, следует иметь в виду, что часто встречающиеся на практике комбинации биогенного поражения с другими видами загрязнений в некоторых случаях снижали эффективность расчистки поверхности мрамора с помощью лазера.



Рис. 2

Следует отметить, что при проведении предварительных пробных расчисток на образцах мрамора, содержащих кристаллы пирита, рестав-

раторы столкнулись также с проблемой его локального потемнения на участках, окружающих минеральные включения. Последние встречаются в структуре каррарского мрамора, из которого изготовлены скульптуры Летнего сада, в виде отдельных «точек» или прослоек шириной до 10...15 мм. Поэтому в ходе реставрационных работ во избежание потемнения поверхности скульптуры на таких участках воздействие на них лазерным пучком не производилось. Также в ходе предварительных экспериментов было изучено воздействие лазерного излучения на поверхность мрамора, окрашенную оксидами железа в результате соприкосновения камня с металлической арматурой. Железные стержни использовались на протяжении XX в. при проведении предшествующих реставрационных работ с целью фиксации отдельных деталей скульптуры. Заметим, что такого рода загрязнения довольно часто встречаются на старой мраморной скульптуре, имеющей реставрационные восполнения, установленные с использованием железных штырей. В ходе работы выяснилось, что из-за интенсивного поглощения окрашенным материалом лазерного излучения может происходить локальное нарушение целостности микрорельефа и потемнение поверхности мрамора. Это позволяет сделать вывод о необходимости исключать обработку лазером подобных участков в процессе реставрации памятников из мрамора.

По результатам очистки скульптур Летнего сада можно сделать вывод о высокой эффективности лазерного удаления биопоражений с их поверхности. Вместе с тем, необходимо заметить, что удаление биопоражений оказалось наиболее эффективным при комбинировании лазерной очистки с биоцидными (химическими) методами обработки мрамора, поскольку практически все скульптуры Летнего сада имели очень высокую эрозию поверхности.

Очистка мраморной скульптуры в ГМЗ «Царское Село». Работы по очистке мраморной скульптуры Государственного музея-заповедника «Царское Село» были выполнены совместно со специалистами петербургской реставрационной компании «Ресстрой» в период 2007–2010 гг. В числе главных объектов, которые очищались с помощью лазерной обработки, были скульптуры «Зефир, качающийся на ветке» (далее сокращенно – «Зефир») и «Примавера».

«Зефир» – это мраморная скульптура из белого каррарского мрамора, имеющая размеры 1.2 × 0.7 м. Автор – скульптор В. П. Бродзский (работа вы-

полнена им в 1860 г. в Риме (Италия)). Ранее эта скульптура неоднократно подвергалась реставрационным воздействиям (последний раз – в 1991 г.), в ходе которых была проведена расчистка поверхности, выполнены доделки из мрамора и мастиковка мелких утрат из материала ПБМА. Кроме того, поверхность антисептировалась (в целях борьбы с биопоражениями) и покрывалась консервантом и воском.

К моменту начала описываемых реставрационных работ обследование скульптуры выявило множественные загрязнения и повреждения ее поверхности, наиболее характерными из которых были:

1. Значительное биологическое заражение (в виде пятен черного цвета по всей поверхности скульптуры, которые явились результатом поражения мрамора микроскопическими грибами родов *Alternaria*, *Cladosporium*, *Exophiala*, *Ulocladium*) (рис. 3. Состояние скульптуры «Зефир» до реставрации: слева – общий вид, справа – отдельные фрагменты поверхности мрамора).

2. Значительная эрозия мрамора (проявляющаяся в виде выветривания отдельных участков поверхности).

3. Наличие гипсовых корок черного и темно-серого цвета (главным образом, в углублениях и труднодоступных местах скульптуры).

4. Стойкие загрязнения, в том числе трудноудаляемые темные налеты биологического характера, которые находились как на открытых участках, так и в углублениях, кроме того, глубоко проникли в разрыхленные поры выветренных участков поверхности мрамора.

5. Остатки мастировок из ПБМА на поверхности мрамора толщиной в отдельных местах до 1...2 мм.

6. Множественные фрагменты силиконовой резины (в виде «чешуек» длиной 5...15 мм, шириной 3...10 мм и толщиной около 0.5 мм) и кусочки пластилина на поверхности «Зефира» (как на открытых участках, так и в углублениях, а также в завитках волос), которые явились последствием работ по снятию силиконовой формы с целью изготовления копии данной скульптуры.

По решению реставрационного совета музея в ходе реставрации «Зефира» должна была выполняться преимущественно только лазерная очистка его поверхности без использования традиционных методов химической и механической расчистки. Однако перед началом работ по лазерной обработке, согласно общепринятой методике реставрации мраморных скульптур, проводилась тщательная промывка всей поверхности «Зефи-



Рис. 3

ра» водным раствором детского мыла с использованием волосяных щеток и парогенератора.

После этого проводились пробные расчистки мрамора при помощи лазера. Как и в случае реставрации скульптур Летнего сада, в этой работе был использован импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер, имеющий те же выходные характеристики. Пробные расчистки были выполнены с тыльной стороны скульптуры (в ее основании) и на складках драпировки под правым плечом. Для удаления загрязнений использовалась влажная лазерная очистка.

Результаты пробных расчисток оказались весьма успешными: при обработке поверхности мрамора излучением лазера с уровнем плотности энергии в диапазоне 16...40 Дж/см² биологические загрязнения удалялись очень легко, причем без ущерба для камня. Однако при удалении наиболее стойких загрязнений на отдельных участках поверхности приходилось работать при существенно более высоких уровнях плотности энергии (вплоть до 70 Дж/см²). И хотя такие уровни плотности лазерного излучения потенциально могут представлять опасность для сохранности мрамора, при очистке «Зефира» никаких негативных последствий лазерной обработки отмечено не было. Что касается удаления черных гипсовых корок, то оно достигалось при значительно меньших уровнях плотности энергии (15...35 Дж/см²) и также не приводило к повреждениям мрамора.

Для выбора выходных параметров лазера при очистке поверхности «Зефира» (а ранее – при очистке скульптур Летнего сада) использовалась следующая методика работы. Удаление любого вида загрязнений всегда начиналось на самом низком уровне плотности энергии импульса лазерного излучения. Затем плотность энергии постепенно (пошагово – с интервалом установки уровня энергии 100...200 мДж) увеличивалась до такого значения, при котором происходило эффективное удаление поверхностных загрязнений. Заметим,

что в процессе лазерной очистки памятников общее правило работы с лазером таково, что ни в коем случае не следует стремиться работать при самых высоких уровнях плотности энергии. Это означает, что после удаления наиболее стойких загрязнений для работы на соседних участках нужно по возможности максимально уменьшить уровень плотности энергии лазерного излучения.

Что касается скорости лазерной обработки, то она определяется частотой повторения импульсов – для увеличения скорости нужно повышать частоту. Однако для исключения локального перегрева поверхности (что может привести к появлению микродефектов поверхности) при очистке мрамора целесообразно ограничивать частоту на уровне 10...15 Гц.

Следует отметить, что наибольшие трудности в ходе лазерной реставрации «Зефира» вызвала расчистка участков поверхности со следами мастиковок из ПБМА, а также с остатками силиконовой резины и используемого для ее затвердевания кремнийорганического компаунда. Наличие последних материалов на поверхности скульптуры объяснялось тем, что перед началом реставрации «Зефира» была снята силиконовая форма для изготовления копии данной скульптуры.

При обработке участков с ПБМА изменялся цвет мастиковок (с исходного белого на темно-серый с коричневатым оттенком). Из-за этого приходилось удалять лазером не только следы загрязнений на слое из ПБМА, но и сам слой мастиковок (полностью – до белого мрамора), что значительно увеличивало время обработки. Серьезные проблемы отмечались также и при работе на участках с остатками силикона, поскольку в этих местах происходило возгорание невидимых на глаз тонких каучуковых пленок. В этих местах образовывался тонкий слой копоти, который затем приходилось тщательно удалять лазером.

Несмотря на все трудности, в ходе работы были подобраны такие значения выходных пара-

Таблица 2

Виды загрязнений скульптуры «Зефир» и параметры лазера, использованные для их удаления

Вид загрязнения	Плотность энергии, Дж/см ²	Частота повторения импульсов, Гц
Биогенные загрязнения	15...70	10...15
Гипсовые корки	15...35	10
ПБМА	25...100	10
Силиконовая резина	35...90	10



Рис. 4



метров лазера (табл. 2), которые позволили полностью очистить поверхность скульптуры. При этом качество в полной мере удовлетворяло требованиям музейной реставрации, подразумевающей проведение деликатной расчистки без ущерба для поверхности и с сохранением патины времени (рис. 4. Скульптура в процессе (слева) и после завершения (справа) лазерной очистки).

Хотелось бы отметить, что эффективность лазерной обработки оказалась столь высока, что,

как и было запланировано перед началом реставрационных работ, удалось полностью исключить использование химических реагентов.

Еще одним скульптурным памятником из коллекции ГМЗ «Царское Село», при реставрации которой использовалась технология лазерной очистки, был мраморный бюст «Примавера» (неизвестный скульптор, начало XVIII в., Италия; рис. 5. Общий вид с биологическими поражениями поверхности мрамора перед началом реставрационных работ, рис. 6: слева – состояние в процессе лазерной очистки (полностью очищена левая половина); справа – после завершения реставрационных работ).



Рис. 5

Как и в случае «Зефира», на поверхности мрамора имелись стойкие сажепылевые и биологические загрязнения. Однако тщательное микологическое обследование показало не только наличие микромицетов (видов *Alternaria alternata*, *Cladosporium herbarum*, *Exophiala jeanselmei*, *Rhodotorula sp.*), но и слоевищ накипных лишайников. Все указанные виды загрязнений были полностью удалены в результате лазерной очистки. Значения рабочих параметров лазерного излучения, использованные в ходе данной работы, были аналогичны тем, которые использовались при очистке «Зефира».

Описанные в данной статье результаты практических работ по очистке мраморных скульптур



Рис. 6

с помощью лазера полностью подтвердили достоверность выводов по итогам исследований по отработке лазерной технологии удаления биопоражений, ранее проведенных на модельных образцах камня. Таким образом, импульсный Nd:YAG-лазер с длиной волны 1.064 мкм может быть использован в реставрации скульптур из мрамора для удаления биологических поражений наряду со всеми другими видами загрязнений экстерьерных каменных памятников. Подводя итоги многолетних исследований авторов, можно сделать вывод о том, что лазерная очистка является

эффективным и безопасным методом защиты каменных памятников от биодеструкторов и может быть рекомендована для широкого практического использования в реставрационной практике.

Авторы выражают благодарность И. Ю. Кирцидели (БИН РАН) за помощь в проведении микологического анализа памятников и обсуждение полученных результатов. Благодарим также сотрудников Государственного Русского музея П. А. Лазарева, А. В. Казанову, О. И. Иванова и А. Ю. Баруздина, принимавших участие в работе по лазерной очистке скульптур Летнего сада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребрикова Н. Л. Биология в реставрации. М.: РИО ГосНИИР, 1999. 184 с.
2. Геращенко А. Н., Кирцидели И. Ю., Парфенов В. А. Удаление биологических загрязнений с поверхности памятников из камня при помощи лазерной обработки (экспериментальные основы лазерного удаления биопоражений) // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 6. С. 79–86.
3. Геращенко А. Н., Кирцидели И. Ю., Парфенов В. А. Удаление биологических загрязнений с поверхности памятников из камня при помощи лазерной обработки (экспериментальные основы лазерного удаления биопоражений) // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 9. С. 79–86.
4. Болдина О. Н., Геращенко А. Н., Парфенов В. А. Удаление биологических загрязнений с поверхности памятников из камня при помощи лазерной обра-
- ботки (лазерное удаление микроскопических водорослей) // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 10. С. 66–73.
5. Laser cleaning of stone by different laser pulse duration and wavelength / S. Siano, M. Giamello, L. Bartoli, A. Mencaglia, V. Parfenov, R. Salimbeni // Laser Physics. 2008. Vol. 18, № 1. P. 1–10.
6. Исследование фототермических процессов при лазерной очистке каменных памятников (эксперимент) / S. Siano, L. Bartoli, A. Mencaglia, R. Salimbeni, M. Giamello, В. А. Парфенов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 2. С. 51–57.
7. Исследование фототермических процессов при лазерной очистке каменных памятников (теоретическое рассмотрение) / С. Сиано, Л. Бартоли, А. Менкалья, Р. Салимбени, М. Джамелло, В. А. Парфенов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 3. С. 45–50.

A. N. Gerashchenko

Tel Aviv University (Tel Aviv, Israel)

V. A. Parfenov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

REMOVAL OF BIODETERIORATION FROM SURFACE OF STONE MONUMENTS BY MEANS OF LASER TREATMENT. CASE STUDIES OF CONSERVATION WORKS CARRIED OUT BY LASER

Results of conservation works on conservation of marble sculptural monuments, which have been carried out in St. Petersburg, by means of pulsed solid-state Nd:YAG laser with wavelength of 1064 nm are presented. It was shown that laser treatment allows one to remove from sculptures surface both biological films (including microfungi and lichens) and other typical deterioration layers.

Biological destruction of monuments, microscopic fungi, lichens, laser cleaning, restorati
