

A. V. Grabovskiy

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

SIGNAL PROCESSING OF MULTI-CHANNEL EDDY CURRENT SCANNERS

Presents the principles of signal processing with multi-channel eddy current scanners, which are based on differential probes. Presents the principle of elimination of the trend due to the air gap variation. Considered median filtering and filtering by the accumulation. Presents the principle of filtering of the signals from the constructive elements of the controlled object. Marked disadvantages of scanners.

Eddy current testing, multi-channel scanners, digital signal processing, filtering, the optimum detector in defectoscopy

УДК 681.7.069.24:620.193.82:069.44

О. Н. Болдина

ФГБУН Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН (БИН РАН)

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 (лазерное удаление микроскопических водорослей)¹

Приводятся результаты экспериментальных исследований по разработке лазерной технологии удаления микроскопических водорослей с каменных поверхностей. В работе использовался импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер с длиной волны 1.064 мкм и образцы из мрамора и известняка. Проведена оптимизация выходных параметров данного лазера для определения доз облучения, при которых происходит механическое удаление и инактивация этих микроорганизмов.

Биологические поражения памятников, микроскопические водоросли, 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], [3], лазерная очистка может рассматриваться как перспективный метод борьбы с микроорганизмами-биодеструкторами.

Авторами статьи ранее были проведены эксперименты по обработке спор микроскопических грибов при помощи импульсного Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм. Описанные в [2], [3] результаты этих исследований показали возможность полного удаления и/или инактивации мик-

ромицетов под действием лазерного излучения. В данной статье рассматривается возможность использования лазерной обработки для удаления еще одного вида биологических поражений памятников – микроскопических водорослей. Далее приведены результаты этих исследований.

Подготовка образцов мрамора и известняка с водорослями на поверхности и методика цитологического анализа. Экспериментальные исследования по лазерной обработке водорослей, так же как и в случае микромицетов [2], [3], проводились на образцах мрамора и известняка. Образцы мрамора представляли собой небольшие (размером около $2 \times 2 \times 2$ см) кубики из белого

¹ Продолжение. Начало в № 6, 9 за 2016 г.

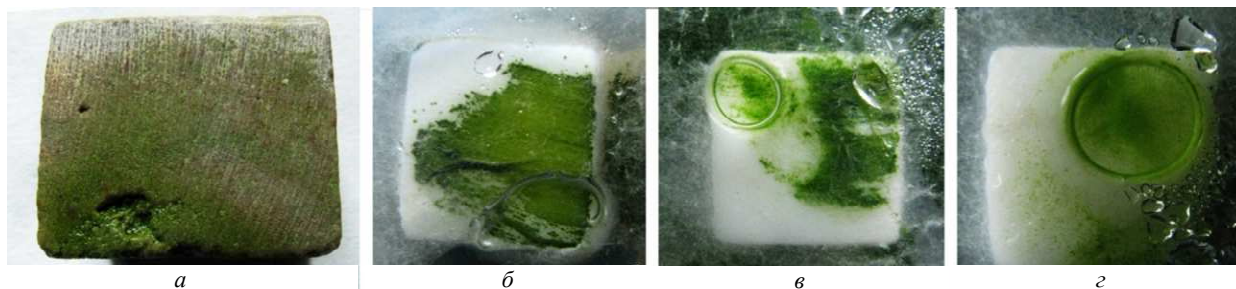


Рис. 1. Образцы известняка (а) и мрамора (б – з) с выращенными на них культурами водорослей: а – *Pseudococcomyxa simplex*; б – *Eustigmatos magnus*; в – *Chlamydomonas noctigama*; з – *Chlorella sp.*



Рис. 2. Водоросли с поверхности скульптур Екатерининского парка (ГМЗ «Царское Село») (а), а также клеточные культуры *Stichococcus bacillaris* (б) и *Chloroidium sp.* (в). Масштабная линейка – 10 мкм

мелкозернистого каррарского мрамора, из которого изготовлено большинство экстерьерных (т. е. экспонируемых на открытом воздухе) скульптурных памятников Санкт-Петербурга и его пригородов. Образцы известняка также имели форму кубиков с аналогичными размерами; они были изготовлены из так называемого пудостского камня – породы известняка, широко использовавшегося при создании многих петербургских памятников в XVIII–XIX вв.

Указанные образцы помещали в чашки Петри или бюксы в застывающую агаризованную среду Болда [4] таким образом, чтобы поверхность камня, покрытая водорослями, оставалась на 2...4 мм выше уровня среды. Это давало возможность зафиксировать положение образцов для удобства последующей лазерной обработки. Внешний вид образцов представлен на рис. 1.

В качестве биодеструкторов мрамора и известняка были выбраны широко распространенные виды почвенных и аэрофильных водорослей [5], [6]: *Pseudococcomyxa simplex*, *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas noctigama*, *Chlamydomonas applanata*, *Chlamydomonas sp.*, *Eustigmatos magnus* из коллекции штаммов лаборатории альгологии БИН РАН. Эти водоросли относятся к различным семействам зеленых (*Chlorophyta*) и эустигматофитовых (*Eustigmatophyta*) водорослей и существенно различаются между собой по размерам клеток и составу клеточных оболочек [7].

Помимо них в экспериментах были использованы также некоторые виды водорослей, выделенные с мраморных и известняковых памятников Санкт-Петербурга, а именно Некрополя Александро-Невской лавры, Екатерининского и Павловского парков (рис. 2), а также замка Шенонсо во Франции (в департаменте Эндр и Луара) (рис. 3). Кроме того, в работе использовались сообщества водорослей, выросшие в течение 1 месяца на аналогичных поверхностях мрамора и известняка в естественных условиях, вблизи экстерьерных памятников Санкт-Петербурга (рис. 4). В этой серии экспериментов вместо кубиков использовали простерилизованные пластинки из мрамора и известняка размером 1.5×1.5 см и толщиной около 0.3 см, которые прикрепляли с помощью двустороннего скотча в полузатененных местах непосредственно рядом с памятниками (рис. 5, 6).

Выделение водорослей с поверхностями скульптур и памятников проводили методом клонирования на агаризованных средах. Подготовленные культуры водорослей, а также водоросли из коллекции БИН РАН наносили на поверхность образца стерильной кистью. Для контроля роста водоросли оставшаяся часть мазка наносилась непосредственно на поверхность питательной среды. Далее чашки Петри с образцами герметично запаковывали и помещали в холодильник-витрину, в которой они находились при температуре 12...14 °C в условиях искусственного освещения

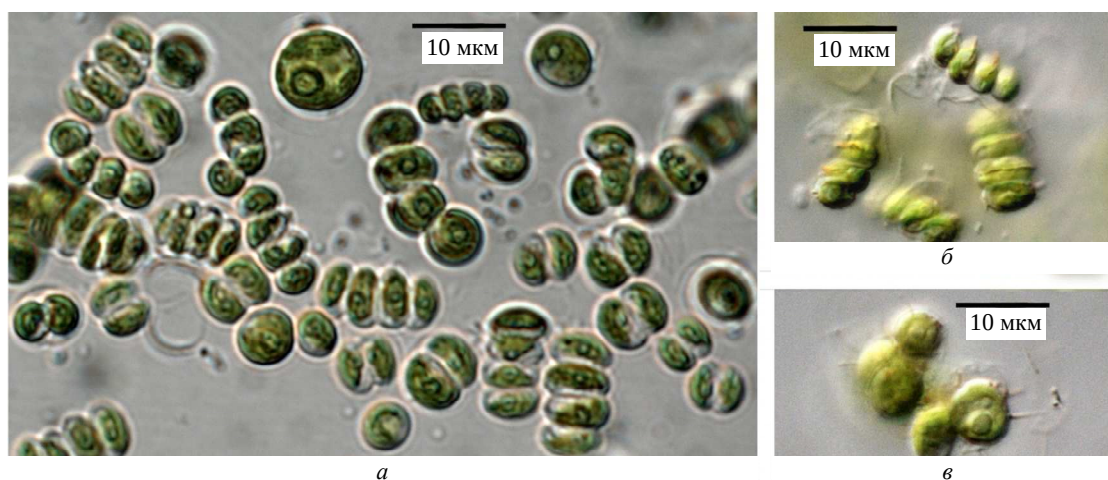


Рис. 3. Культура водорослей *Desmodesmus sp.*, выделенная со стен замка Шенонсо, на разных стадиях развития: 1–3-месячная культура на агаре (а), 10-дневная (б) и 5-дневная (в) культуры в жидкой среде

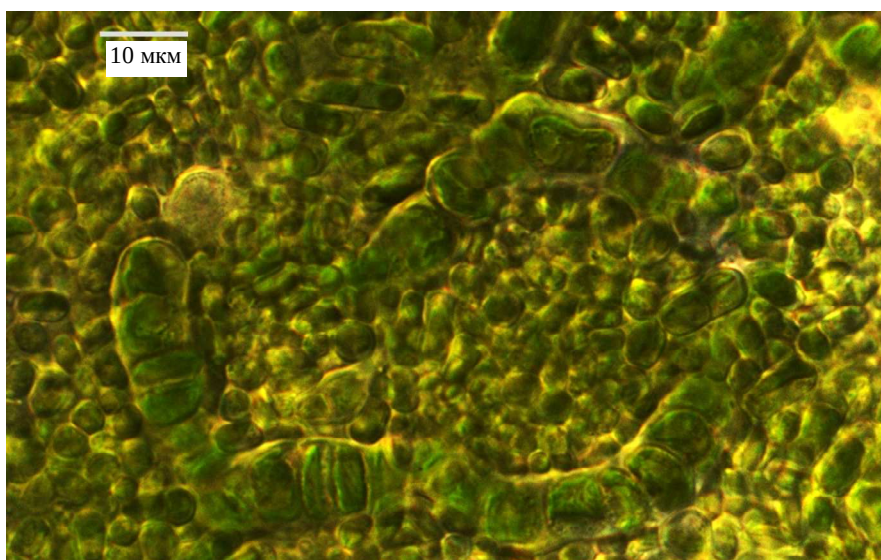


Рис. 4. Водоросли, выращенные на пластинках мрамора в Некрополе Александро-Невской лавры. В центре хорошо различимы нитчатые талломы *Klebsormidium sp.* Масштабная линейка – 10 мкм



Рис. 5. Образцы известняка и мрамора с сообществами водорослей, засеянными непосредственно у памятников и выращенными в чашке Петри в лабораторных условиях

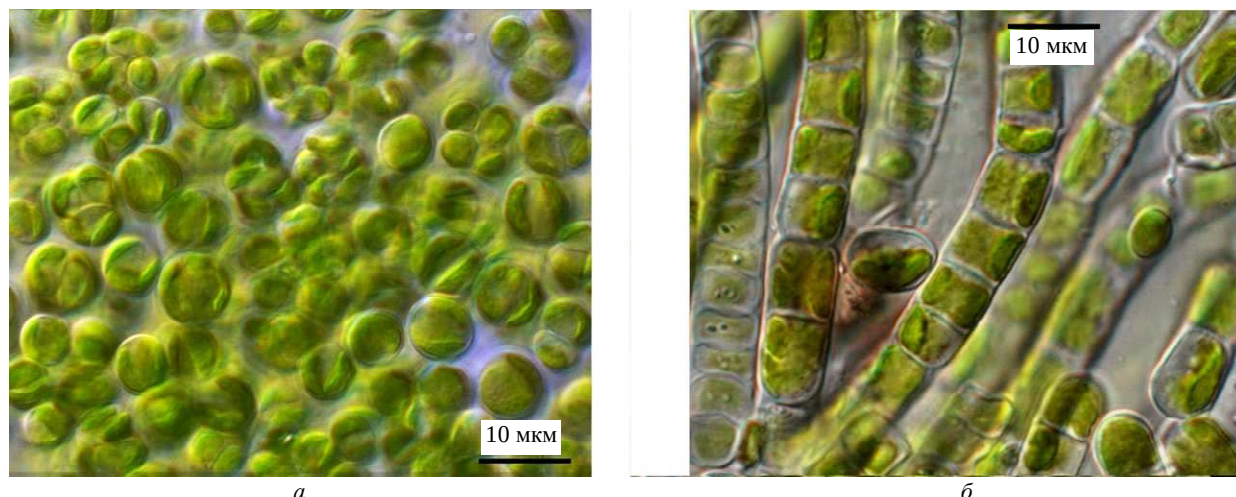


Рис. 6. Культуры водорослей *Elliptochloris* sp. (а) и *Klebsormidium* sp. (б), выделенные с поверхности скульптурных памятников и закрепленных вблизи них пластинок мрамора и известняка в Некрополе Александро-Невской лавры. Масштабная линейка – 10 мкм

с поверхностной плотностью потока фотонов около $20 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$ в течение 1–3 мес. Таким образом, в чашках/бюксах создавались благоприятные условия для роста колоний водорослей: повышенная влажность, умеренные температура и освещенность.

Для интенсификации роста водорослей, засеянных при экспозиции в естественных условиях, образцы камней из каждого локализата размещали в индивидуальных чашках и доращивали в холодильнике-витрине при тех же условиях, что и засеянные культурами бюксы/чашки. Все манипуляции с культурами осуществляли в стерильных условиях с использованием простерилизованных инструментов и каменных образцов.

Идентификацию и фотографирование клеток водорослей производили с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss AxioImager.A1 и цифровой камеры AxioCam MRc5 в Центре коллективного пользования БИН РАН.

Подготовленные согласно описанной методике образцы мрамора и известняка с водорослями на поверхности обрабатывали при помощи импульсного твердотельного Nd:YAG-лазера с длиной волны 1.064 мкм . В экспериментах использовался тот же лазер, что и в серии экспериментов по удалению и инаktivации микромицетов [2], [3] (целесообразность выбора данного лазера для удаления микроорганизмов-биодеструкторов подробно рассмотрена в [2]). Он имел следующие рабочие выходные параметры: диаметр пучка 2 мм , энергия импульса $1.8...2 \text{ Дж}$ (что соответствует уровню плотности энергии $57...63 \text{ Дж/см}^2$), частота повторения импульсов 10 Гц .

Лазерную обработку проводили на образцах с хорошо заметными колониями водорослей, чаще всего сливавшимися в сплошной слой (см. рис. 1, б). Время облучения одного образца (площадью $2 \times 2 \text{ см}$) составляло 90 с . Как уже было отмечено, в отличие от лазерной обработки микромицетов в случае водорослей требовалось очень длительное время как для подготовки образцов (до 3 месяцев), так и для проверки результатов лазерной обработки (до 1 года). С учетом большой продолжительности времени, необходимого для оценки результатов экспериментов, на их предварительной стадии были определены минимальные уровни плотности энергии лазерного излучения, достаточные для удаления водорослей с поверхности камня. Факт удаления водорослей (на основе чего осуществлялся выбор необходимой плотности энергии излучения лазера) можно зафиксировать невооруженным глазом. В частности, на рис. 7 на поверхности агара хорошо заметен рост только контаминантных грибов и бактерий, занесенных с воздухом при помещении образцов в чашку Петри, а сами водоросли отсутствуют. Определенные таким образом значения плотности энергии излучения лазера (они составляли указанное ранее значение $57...63 \text{ Дж/см}^2$) использовались в ходе дальнейших экспериментов по удалению водорослей с модельных образцов мрамора и известняка.

Результаты экспериментов по лазерной инаktivации водорослей. Для проверки результатов лазерной обработки облученные образцы помещали в чашки Петри/бюксы со свежей стерильной средой и герметично упаковывали, после чего их содержали в условиях, благоприятных

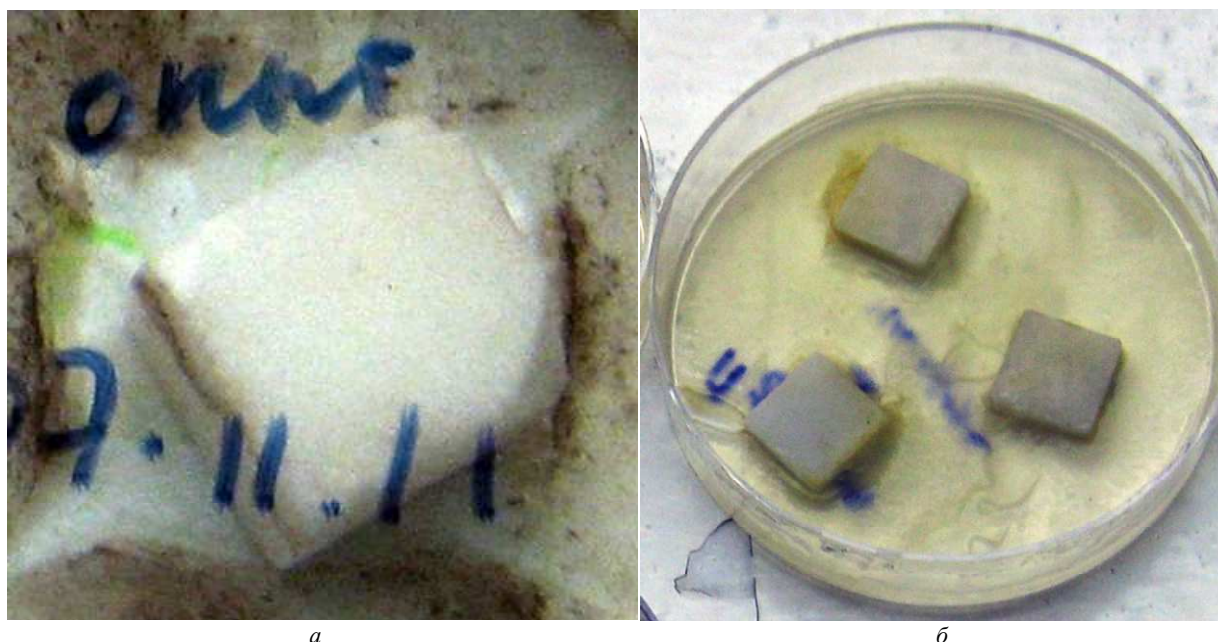


Рис. 7. Образцы мрамора после обработки лазером и 6-месячного (а) и 12-месячного (б) содержания в холодильнике-витрине в благоприятных для роста водорослей условиях

для роста водорослей. Через 3, 6 и 12 месяцев регистрировали наличие или отсутствие роста каких-либо фототрофных колоний на поверхности образцов (отдельно для мрамора и известняка). Эксперименты проводили с каждым видом водорослей, а также естественными водорослевыми сообществами, выращенными на пластинках, сериями по 3–4 раза. Все это обеспечило многократную повторяемость экспериментов.

Важно отметить, что исследование возможности удаления водорослей при помощи лазерной обработки представляло собой очень сложную задачу. Не все первоначально выбранные штаммы из лабораторной коллекции одинаково хорошо смогли расти и на мраморе, и на известняке. Поэтому анализировали только те из них, которые давали визуально различимые колонии или заменяли другим штаммом этого же вида. Этим объясняются различия по составу объектов на разных минералах в табл. 1, где представлены виды микроскопических водорослей, использованные в экспериментах по лазерной очистке.

Водоросли, развивающиеся в аэрофильных условиях, представляют собой крайне разнообразную в цитологическом отношении группу, хорошо приспособленную к механическим воздействиям внешней среды и активно использующую солнечную радиацию для развития. За долгий период эволюции они выработали разнообразные механизмы защиты от излучений. Среди выросших на пластинках мрамора водорослей, наряду с использованными в первоначальных экспериментах водорослями

из коллекции БИН РАН, оказались также водоросли из отдела *Charophyta* (*Klebsormidium* sp.), эволюционно близкие к высшим растениям (см. рис. 4; 6, б); разнообразные по морфологии таксоны из группы *Trebouxiophyceae* (*Chlorophyta*) – *Chloroidium*, *El-liptochloris*, *Diplosphaera*, *Stichococcus*, *Pseudococcomyxa* и *Trebouxia*; ульвовая (*Ulvophyceae*, *Chlorophyta*) *Trentepohlia*; и только одна водоросль из группы *Chlorophyceae* (*Chlorophyta*) – *Desmodesmus*. Все выявленные на памятниках архитектуры водоросли являются типичными обитателями каменистых поверхностей и неоднократно регистрировались другими исследователями [5], [6].

Преобладающие в образцах требуксиевые водоросли (см. рис. 2, 8) представляют собой наиболее активную часть биодеструкторов. Они легко поселяются на поверхностях архитектурных памятников и, как правило, имеют высокие скорости размножения. Кроме того, плотные целлюлозные оболочки требуксиевых водорослей снаружи покрыты высокоустойчивым к внешним воздействиям слоем, содержащим альгелан [7]. Нитчатая водоросль *Trentepohlia* также хорошо защищена от внешних воздействий толстой целлюлозной оболочкой со специфическим строением апикальной части нитей (рис. 9). Эти и другие аэрофильные водоросли, имеющие относительно тонкие оболочки у вегетативных клеток, характеризуются наличием покоящихся клеток (акинеты, цисты, зиготы) с очень толстыми плотными оболочками, с включениями дополнительных полимерных

Таблица 1

Материал образца	Вид водорослей	Источник штамма
Мрамор	<i>Chlamydomonas applanata</i>	Коллекция лаборатории альгологии БИН РАН
	<i>Chlamydomonas noctigama</i>	
	<i>Chlamydomonas sp.</i>	
	<i>Chlorella vulgaris</i>	
	<i>Eustigmatos magnus</i>	
	<i>Pseudococcomyxa simplex</i>	
	<i>Chloroidium ellipsoideum</i>	
	<i>Diplosphaera sp.</i>	Культуры с памятников г. Санкт-Петербурга (Россия)
	<i>Elliptochloris sp.</i>	
	<i>Klebsormidium sp.</i>	
	<i>Stichococcus bacillaris</i>	
	<i>Trentepohlia sp.</i>	
	<i>Desmodesmus sp.</i>	Культуры с фасадов замка Шенонсо (Франция)
Известняк	<i>Chlamydomonas applanata</i>	Коллекция лаборатории альгологии БИН РАН
	<i>Chlamydomonas noctigama</i>	
	<i>Chlamydomonas typhlos</i>	
	<i>Chlamydomonas sp.</i>	
	<i>Chlorella vulgaris</i>	
	<i>Eustigmatos magnus</i>	
	<i>Pseudococcomyxa simplex</i>	
	<i>Diplosphaera sp.</i>	Культуры с памятников г. Санкт-Петербурга (Россия)
	<i>Elliptochloris sp.</i>	
	<i>Klebsormidium sp.</i>	
	<i>Stichococcus bacillaris</i>	
	<i>Trebouxia sp.</i>	
	<i>Trentepohlia sp.</i>	

компонентов. В покое они могут легко переживать неблагоприятные условия в микротрещинах и выемках каменистых субстратов. Указанные особенности водорослей затрудняют обработку поверхностей памятников традиционными методами и делают ее малоэффективной.

Регистрация результатов лазерной обработки, а именно наличие или отсутствие роста каких-либо фототрофных колоний на поверхности образцов в чашках Петри со свежей стерильной средой в условиях, благоприятных для роста водорослей, через 3, 6 и 12 месяцев, показала эффективность лазерной обработки с выбранными параметрами. Она была подтверждена в результате многократного повторения экспериментов с каждым видом водорослей и естественными водорослевыми сообществами для мрамора и для известняка.

Анализ проведенных экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о том, что при лазерной обработке происходит полное уничтожение клеток водорослей на поверхности образцов мрамора и известняка. При этом лазер позволяет успешно удалять не только клетки отдельных видов водорослей, но и их сообщества,

образовавшиеся на поверхности каменистого субстрата. При этом, как и в случае экспериментов с микроскопическими грибами, поверхность образцов после лазерной обработки остается неповрежденной: в экспериментах сохранялся оригинальный цвет камня и микрорельеф поверхности. Таким образом, проведенные эксперименты продемонстрировали высокую эффективность лазерного удаления водорослей с поверхности мрамора и известняка и одновременно его безопасность для очищаемой поверхности.

В данной статье было показано, что лазерная обработка позволяет эффективно защищать памятники из мрамора и известняка при поражении их поверхности микроскопическими водорослями-биодеструкторами. В результате фототермической абляции материала водорослей при облучении лазером происходит их полное удаление, которое достигается при использовании следующих параметров лазерного излучения: длина волны 1.064 мкм, плотность энергии импульса около 60 Дж/см² при длительности импульса около 90 мкс и частоте повторения импульсов 10 Гц. Следует отметить, что указанный уровень плотности энергии лазерного излучения, требуемый для летального воздействия



Рис. 8. Культуры требуксиевых водорослей *Diplosphaera* sp. (а), и *Trebouxia* sp. (б), выделенные с поверхности скульптурных памятников Павловского парка (ГМЗ «Павловск»). Масштабная линейка – 10 мкм

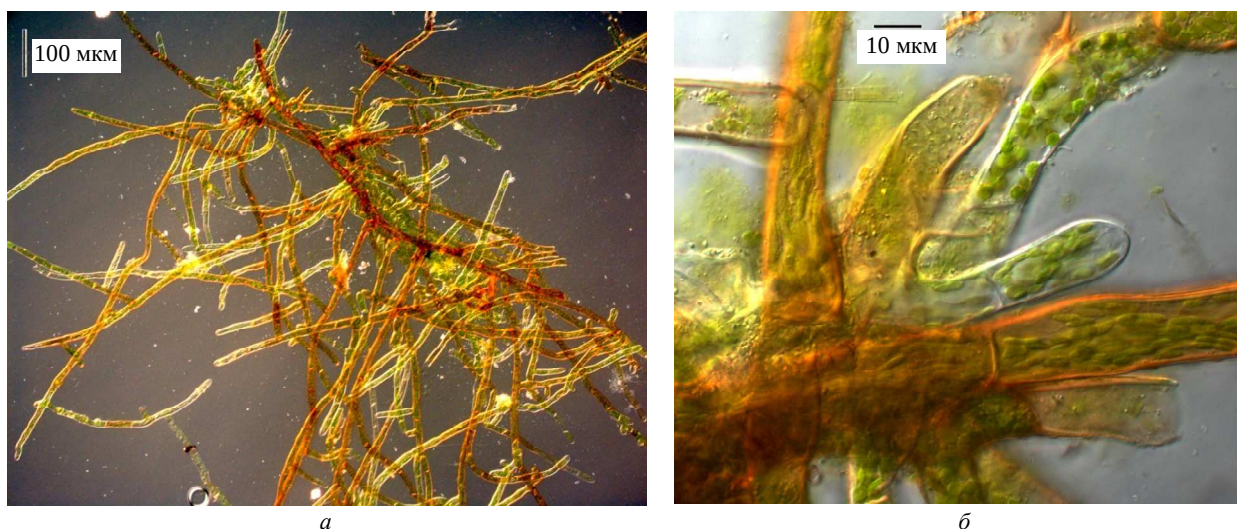


Рис. 9. Водоросли *Trentepohlia* sp. с поверхности пластинок известняка, закрепленных вблизи надгробий в Некрополе Александро-Невской лавры. Масштабные линейки: а – 100 мкм; б – 10 мкм

на водоросли, в 1.5–2 раза выше, чем при удалении микромицетов [3]. Это нужно иметь в виду при проведении практических работ по реставрации скульптурных памятников.

Резюмируя результаты исследований, описанных в [2], [3] и в данной статье, можно сделать вывод о том, что технология лазерной очистки

является эффективным способом борьбы с поражением поверхности каменных памятников микроскопическими грибами и водорослями.

Часть проведенных исследований была выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану БИН РАН по теме № 01201255605.

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. 48–53.
4. Deason T. R., Bold H. C. Exploratory studies of Texas soil algae // Phycological Studies. 1960. Vol. I, № 6022. P. 1–72.
5. Лишайники, мохоподібні та наземні водорості гранітних каньйонів України / Т. І. Михайлюк, С. Я. Кондратюк, С. О. Нипорко, Т. М. Дарієнко, Е. М. Демченко, А. О. Войцехович. Київ: Альтерпрес, 2011. 398 с.

6. Darienko T., Hoffmann L. Algal grows on cultural monuments in Ukraine // *Biologia*. 2003. Vol. 58, № 4. P. 575–587.

7. The Cell Walls of Green Algae: A Journey through Evolution and Diversity / D. S. Domozych, M. Ciancia, J. U. Fangel, M. D. Mikkelsen, P. Ulvskov, W. G. T. Willats // *Front Plant Sci*. 2012. Vol. 3, № 00082.

O. N. Boldina

Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences

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. LASER REMOVAL OF MICROSCOPIC ALGAE

Results of experimental studies on development of laser technology for removal of microalgae from stone surfaces are presented. In the work pulsed solid-state Nd:YAG laser with wavelength of 1064 nm and model samples from marble and sandstone were used. The task on the optimization of laser output parameters for achievement of exposure doses requiring for mechanical ejection and inactivation of different aerial algae species was successfully performed.

Biological destruction of monuments, microscopic fungi, laser cleaning, restoration

УДК 620.179.16

К. С. Паврос, И. Г. Сидоренко, А. В. Теплякова

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

Анализ акустической помехи при ультразвуковом контроле листов поперечными волнами

Проведен анализ амплитуды акустической помехи при ультразвуковом контроле листового проката поперечными волнами в контактном варианте. В качестве помехи при проведении расчетов использовано явление излучения преобразователем продольных волн.

Ультразвуковой неразрушающий контроль, листовый прокат, эхометод ультразвукового контроля, акустическая помеха

Массовый сдаточный контроль листового проката, к качеству которого в настоящее время предъявляют весьма высокие требования, осуществляют путем прозвучивания узким ультразвуковым пучком продольных или поперечных волн, формируемых пьезоэлектрическими или электромагнитно-акустическими преобразователями конечных размеров. В каждом положении преобразователя прозвучивается небольшой объем металла листа. Приближенно его можно рассматривать как цилиндр, высота которого равна толщине листа, а его основание – сечению ультра-

звукового пучка. При соответствующем перемещении пучка в процессе сканирования листа прозвучивается весь его объем.

При контроле листов эхометодом продольными волнами пьезоэлектрический преобразователь, совершающий колебания по толщине, помимо основной продольной волны, одновременно излучает и поперечные волны, являющиеся источником помех. Из-за существенно меньшей скорости распространения поперечных волн по сравнению с продольными такая помеха попадает только во временной интервал между первым и