

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-10-93-107

УДК 621.373.826

Лазерное удаление фоксингов со страниц книг и документов на бумажной основе

СВЕТЛАНА АЛЕКСАНДРОВНА ДОБРУСИНА¹, ВАДИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ ПАРФЕНОВ²✉,
НАТАЛИЯ ИВАНОВНА ПОДГОРНАЯ³, НИНА ДМИТРИЕВНА САМСЫГИНА⁴,
СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ТИТОВ⁵, АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ПЕТРОВ⁶,
ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ АСЕЕВ⁷

^{1, 3}Российская национальная библиотека, Санкт-Петербург, Россия

^{2, 4}Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, Россия

⁵ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург, Россия

^{6, 7}Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹dobrusina@nlr.ru

<http://orcid.org/0009-0001-7505-2767>

²vapارفenov@etu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-2048-4677>

³conservation@nlr.ru

<http://orcid.org/0009-0000-7852-1322>

⁴ninel-ovdienko@mail.ru

<http://orcid.org/0009-0007-3196-9825>

⁵morterictusgrin@yandex.ru

<http://orcid.org/0009-0007-6297-7713>

⁶aapetrov@itmo.ru

<http://orcid.org/0000-0002-2853-6478>

⁷aseev@itmo.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4098-2136>

Аннотация

Предмет исследования. Данная работа посвящена удалению фоксинговых пятен со страниц книг и документов на бумажной основе. **Цель работы.** Определение выходных параметров лазеров, позволяющих проводить эффективное и безопасное удаление фоксингов. **Метод.** В экспериментах были использованы импульсные лазеры: твердотельный Nd:YAG-лазер с длиной волны 0,53 мкм и эксимерный ArF-лазер с длиной волны 0,193 мкм. **Основные результаты.** Показано, что наиболее высокая эффективность удаления фоксингов достигается при их обработке ArF-лазером. Наилучшие результаты достигаются при использовании влажной лазерной обработки в случае бумаги, содержащей волокна древесной целлюлозы, и сухой обработки — для бумаги, содержащей древесную массу. Оптимальными выходными характеристиками ArF-лазера, которые обеспечивают эффективное удаление фоксинговых пятен, являются следующие: плотность энергии — 0,21–0,34 Дж/см², частота повторения импульсов — 1–2 Гц, длительность импульса — 10 нс. Предложена и экспериментально проверена методика количественной оценки эффективности удаления фоксингов, основанная на анализе цифрового оптического изображения исследуемого участка книги или документа до и после лазерной обработки. Данная методика отличается простотой в использовании и не требует применения дорогостоящего аналитического оборудования. Показана высокая эффективность лазерного удаления фоксингов в долгосрочной временной перспективе. **Практическая ценность.** Полученные в работе результаты позволяют говорить о преимуществе лазерной обработки бумажных листов книг и документов с фоксингами по сравнению с традиционными методами реставрации и рекомендовать данную технологию для проведения практических реставрационных работ в библиотеках и архивах.

Ключевые слова: лазерная очистка, реставрация, фоксинги, книги, документы, бумага, Nd:YAG-лазер, ArF-лазер, фотоабляция

Ссылка для цитирования: Добрусина С.А., Парфенов В.А., Подгорная Н.И., Самсыгина Н.Д., Титов С.В., Петров А.А., Асеев В.А. Лазерное удаление фоксингов со страниц и документов на бумажной основе // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 10. С. 93–107. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-93-107>

Коды OCIS: 350.3390; 140.1550.

Laser removal of foxings from pages of books and documents on a paper basis

**S.A. DOBRUSINA¹, V.A. PARFENOV²✉, N.I. PODGORNAYA³,
N.D. SAMSYGINA⁴, S.V. TITOV⁵, A.A. PETROV⁶, V.A. ASEEV⁷**

^{1, 3}*Russian National Library, Saint-Petersburg, Russia*

^{2, 4}*Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia*

⁵*The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg, Russia*

¹*dobrusina@nlr.ru*

<http://orcid.org/0009-0001-7505-2767>

²*vapارفенов@etu.ru*

<http://orcid.org/0000-0002-2048-4677>

³*conservation@nlr.ru*

<http://orcid.org/0009-0000-7852-1322>

⁴*ninel-ovdienko@mail.ru*

<http://orcid.org/0009-0007-3196-9825>

⁵*morterictusgrin@yandex.ru*

<http://orcid.org/0009-0007-6297-7713>

⁶*aapetrov@itmo.ru*

<http://orcid.org/0000-0002-2853-6478>

⁷*aseev@itmo.ru*

<http://orcid.org/0000-0003-4098-2136>

Abstract

Subject of study. This work is devoted to the removal of foxing spots from the pages of books and documents on a paper basis. **Aim of study.** Determination of the output parameters of lasers that allow effective and safe removal of foxings. **Method.** Pulsed lasers were used in the experiments: a solid-state Nd:YAG laser with a wavelength of 0.53 microns and an excimer ArF laser with a wavelength of 0.193 microns. **Main results.** It is shown that the highest efficiency of foxings removal is achieved when they are treated with an ArF laser. The best results are achieved when using wet laser treatment in the case of paper containing wood pulp fibers, and dry treatment — for paper containing wood pulp. The optimal output characteristics of the ArF laser, which provide effective removal of foxing spots, are the following: energy density — 0.21–0.34 J/cm², pulse repetition rate — 1–2 Hz, pulse duration — 10 ns. A technique for quantifying the effectiveness of foxing removal based on the analysis of a digital optical image of the studied section of a book or document before and after laser treatment is proposed and experimentally verified. This technique is easy to use and does not require the use of expensive analytical equipment. The research shows the high efficiency of foxings laser removal in the long-term time perspective. **Practical significance.** The results obtained in the work allow us to talk about the advantage of laser treatment of books and documents paper sheets with foxings compared to traditional restoration methods and recommend this technology for practical restoration work in libraries and archives.

Keywords: laser cleaning, restoration, foxings, books, documents, paper, Nd:YAG laser, ArF laser, photoablation

For citation: Dobrusina S.A., Parfenov V.A., Podgornaya N.I., Samsygina N.D., Titov S.V., Petrov A.A., Aseev V.A. Laser removal of foxings from pages of books and documents on a paper basis [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 10. P. 93–107. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-93-107>

OCIS codes: 350.3390, 140.1550.

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение лазерной техники в области сохранения объектов культурно-исторического наследия является новым, но быстроразви-

вающимся научно-техническим направлением. Наиболее часто лазеры используются для определения химического состава, структурной диагностики и документирования произ-

ведений искусства. Эти применения основаны на использовании методов лазерной спектроскопии, интерферометрии, голографии и 3D-сканирования [1, 2].

В реставрации используют технологию лазерной очистки, которая позволяет решать задачи по удалению природных наслоений и антропогенных загрязнений с поверхности объектов культурно-исторического наследия [1].

Однако, несмотря на то, что лазеры впервые были использованы в реставрации более 50 лет назад, к настоящему времени наиболее отработана только технология очистки камня и металла. По таким применениям лазеров существует очень обширная библиография [1–7]. Но при этом лазерная реставрация других, и в первую очередь, органических материалов всё ещё находится в стадии проведения поисковых научно-исследовательских работ. Это связано с тем, что в процессе их лазерной обработки могут происходить повреждения поверхности, что недопустимо по канонам реставрации. Именно это обстоятельство требует проведения дополнительных исследований и отработки технологии лазерной очистки при реставрации объектов из органических материалов, в том числе бумаги. Следует отметить, что в настоящее время проблемой лазерной очистки занимается несколько научных групп в разных странах мира. Цель этих научно-исследовательских работ заключается в разработке специализированных лазерных систем, предназначенных для реставрации книг и документов на бумажной основе [13–16].

Данная статья лежит в русле упомянутых исследований и посвящена исследованию возможности применения лазеров для решения важной практической задачи — удалению фоксингов, которые являются одним из наиболее сложных и распространённых типов повреждения бумажных листов. Фоксинги представляют собой цветные пятна на поверхности бумаги, имеют нерегулярный окрас от желтовато-красного до тёмно-коричневого оттенка.

Сложность удаления загрязнений объясняется их способностью пронизывать лист бумаги насквозь, поражая при этом смежные страницы, которые соприкасаются с источником загрязнения. Опасности образования фоксингов подвержены все исторические объекты на бумаге. При этом частота их встречаемости довольно высока. Именно по этой причине по-

иск эффективных и безопасных способов удаления фоксингов вызывает интерес исследователей во всём мире.

История этиологии фоксингов насчитывает более шестидесяти лет. Предпринимались неоднократные попытки установить истинную причину их появления на бумаге, причём исследования велись как на уровне визуальных наблюдений, так и с использованием новейших аналитических физико-химических методов. Почти с самого начала исследования фоксингов возникло две версии их возникновения: абиотическая и биотическая. Первая объясняла их образование окислением соединений железа, содержащихся в бумаге, вторая связывала их появление с развитием микроорганизмов (микроскопических грибов, актиномицетов, бактерий). Неоднократно многие авторы, сторонники и одной и другой версии, на основании результатов своих исследований пытались делать выводы о причинах появления фоксингов [12–14].

Но эти выводы не могут считаться окончательными, поскольку впоследствии либо не подтверждались другими исследователями, либо не могли дать ответ на некоторые возникающие вопросы [15]. Как показало время, изучение фоксингов требует не только применения тонких методов исследования, настойчивости и последовательности в интерпретации результатов, но и долговременных наблюдений за состоянием произведений графики, книг и архивных документов в разных условиях хранения.

Обычно фоксинги проявляются в виде небольших пятен размером от нескольких миллиметров до нескольких квадратных сантиметров. В пределах ореола фоксингов бумага имеет более низкое значение кислотности (pH) и более низкую механическую прочность. Кроме того, фоксинги значительно ухудшают внешний вид документа, что затрудняет его восприятие. В процессе реставрационных мероприятий такие пятна, как правило, удаляют.

Удаление происходит отбеливанием, как правило, химическим способом. При этом удаление фоксингов с бумаги, содержащей в составе древесную массу, обычно производится с помощью пероксида водорода, а с бумаги из тряпичных и целлюлозных волокон — хлорамином В [16, 17].

Следует заметить, что удаление фоксингов с помощью химических реактивов при всей

своей эффективности помимо самой обработки требует длительной промывки для удаления остатков активных веществ, в противном случае они могут служить инициаторами деструктивных процессов в бумаге. Кроме того, обработке, как правило, подвергается весь лист целиком, что увеличивает трудоёмкость процесса реставрации и приводит к нежелательному химическому воздействию на те части листа, которые не нуждаются в реставрационном вмешательстве.

Альтернативным методом очистки бумаги от поверхностных загрязнений может быть лазерная обработка. Как уже говорилось выше, в настоящее время изучается возможность применения лазеров в реставрации книг и документов. В частности, из научной литературы известны отдельные работы, посвящённые лазерному удалению фоксингов [18–20].

Однако говорить о решении данной проблемы пока преждевременно, поскольку для этого необходимо проведение целевых систематических исследований. Цель работы — определение выходных параметров лазеров, позволяющих проводить эффективное и безопасное удаление фоксингов. Таким образом, данная работа — это шаг вперед в решении актуальной научной задачи, имеющей высокую практическую значимость.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

2.1. Методы исследований и экспериментальное оборудование

Для проведения экспериментальных исследований по лазерному удалению фоксингов были подготовлены образцы, представляющие собой небольшие (размером около 4×4 см²) фрагменты страниц книг различных временных периодов и из бумаги различного вида. Основными объектами исследования служили листы книги 1961 г. (группа образцов № 1), а также листы книги 1904 г. (группа образцов № 2). Общее количество образцов — 19 шт.

Значительный временной интервал во времени издания этих книг позволяет предположить, что бумага образцов имеет различный композиционный состав, в частности, различия в волокнистом сырье. Однако такое предположение требовало экспериментальной проверки. Состав бумаги по волокну определяли в соответствии с ГОСТ 7500-85 «Бумага

и картон. Методы определения состава по волокну» с использованием реактива Херцберга (раствора хлор-цинк-йода). Окрашивание волокон реактивом Херцберга позволяет выполнить первичную идентификацию природных волокон, определить их группы, подгруппы и виды колористическим методом.

Макрофотографии целлюлозных волокон бумаги получали на оптическом микроскопе Leica DM 2000 с программным обеспечением Leica Application Suite, предназначенным для анализа изображений препаратов при увеличении $\times 200$ в проходящем свете.

Для удаления фоксингов использовалась лазерная обработка. Выбор лазера был сделан на основе анализа научной литературы и ранее полученных авторами результатах собственных работ по лазерной очистке бумаги. В частности, из литературы известно об очистке поверхности книг и документов на бумаге при помощи импульсных эксимерных лазеров [1] и импульсного Nd:YAG-лазера, работающего на основной длине волны [21], а также длинах волн второй (532 нм) и третьей (355 нм) гармоник излучения [10, 22–24]. Из работ, посвящённых непосредственно удалению фоксинговых пятен, известно о применении Nd:YAG-лазера (с длиной волны 532 нм) [18, 19] и эксимерного F₂-лазера с длиной волны 157 нм [20].

С учётом этого, в нашей работе использовался лабораторный макет Nd:YAG-лазера с длиной волны 532 нм и серийно-выпускаемый эксимерный ArF-лазер CL-7020 с длиной волны 193 нм (изготовитель — ООО «Оптические системы», Россия). Основные параметры излучения этих лазеров представлены в табл. 1.

При лазерной очистке различают так называемую сухую и влажную очистку. В последнем случае на очищаемую поверхность наносят тонкий слой жидкости (как правило, воды), что позволяет повысить эффективность и безопасность воздействия лазера [1]. Поэтому в наших экспериментах применялась как сухая, так и влажная лазерная очистка. При этом обработка фоксинговых пятен осуществлялась либо одиночными лазерными импульсами, либо короткими сериями импульсов с низкой частотой повторения (1–2 Гц) для предотвращения избыточного нагрева бумаги, что может приводить к повреждению волокон целлюлозы.

Результаты лазерной обработки оценивались визуально при помощи оптического стереоми-

Таблица 1. Рабочие параметры лазеров, использованные в экспериментах

Table 1. Operating parameters of lasers used in experiments

Тип лазера	Твердотельный Nd:YAG-лазер	Эксимерный лазер ArF
Длина волны излучения, нм	532	193
Рабочая энергия в импульсе, мДж	75	170
Длительность импульса, нс	15	10
Рабочая частота повторений импульсов, Гц	1	1–2
Площадь пучка S для бумаги из древесной массы, см ²	0,5	0,8
Площадь пучка S для целлюлозной бумаги, см ²	0,8	0,5

кроскопа МБС-10. Кроме того, использовались две независимых колориметрических методики, основанных на использовании спектрофотометра и измерении RGB-характеристик.

При инструментальной оценке эффективность отбеливания оценивали по изменению оптических характеристик образцов бумаги до и после обработки и в процессе искусственного тепловлажного старения. Эти измерения выполняли на спектрофотометре «Elrepho 070/071», следуя требованиям ГОСТа (ГОСТ Р ИСО 11475-2010 «Бумага и картон. Метод определения белизны по CIE. D65/10° осветитель (дневной свет)»). Для проведения измерений использовалось программное обеспечение L&W Color Brightness и источник света D65, имитирующий условия дневного освещения на открытом воздухе. В результате таких измерений были измерены значения коэффициента отражения образцов, а также координаты цвета L^* , a^* , b^* до и после лазерной обработки, а также в процессе искусственного старения бумаги. По измеренным значениям L^* , a^* , b^* рассчитывались величины общего цветового различия ΔE . При этом при оценке величины изменений цветовых характеристик мы исходили из данных научной литературы, а именно: изменения цвета характеризуются как неощутимые, если $\Delta E < 0,5$, как заметные, если $\Delta E > 1,6$ и как неприемлемые, если $\Delta E > 3,2$ [26].

Искусственное тепловлажное старение образцов бумаги с фоксингами, подвергавшихся лазерному воздействию, и контрольных образцов бумаги с фоксингами без обработки проводили в термовлагокамере REOCAM в соответствии с международным стандартом ISO 5630-3:1996 «Paper and board — Accelerated ageing. Part 3: Moist heat treatment at

80 degrees C and 65% relative humidity», т. е. при температуре 80 °C и относительной влажности воздуха 65%. При таких условиях 3-е суток старения считаются эквивалентными 25-ти годам естественного старения бумаги. Изменение коэффициента отражения участков бумаги с фоксингами фиксировали через 6 суток.

Возможные изменения морфологии поверхности бумаги до и после обработки лазером определяли при помощи программного комплекса «Vestigium», предназначенного для исследования рукописных памятников посредством анализа их цифровых изображений. Обычно результатом такого анализа является измерение следующих двух параметров: коэффициента изрезанности (это отклонение линии поверхности от идеально ровной) и коэффициента неравномерности (степень выраженности рельефа через соотношение крайних плотностных значений). В данной работе для оценки шероховатости поверхности бумаги до и после лазерной обработки определяли только коэффициент изрезанности [27].

2.2. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования начались с исследования состава бумажных образцов. При окраске реактивом Херцберга волокна бумаги образца № 1 (рис. 1) приобрели сине-фиолетовый окрас, что позволило идентифицировать их как целлюлозные.

Волокна образцов бумаги № 2 окрасились в жёлтый, сине-фиолетовый и пурпурно-красный цвета (рис. 2), что указывает на наличие в её составе древесной массы, а также небольшого количества тряпичных и целлюлозных волокон. Бумага с таким составом может быть

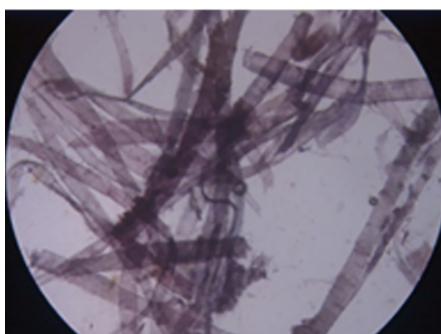


Рис. 1. Микрофотография волокон бумаги, содержащей волокна целлюлозы

Fig. 1. Micrograph of paper fibers containing cellulose fibers

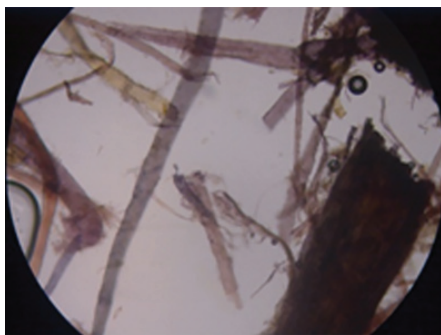


Рис. 2. Микрофотография волокон бумаги из древесной массы

Fig. 2. Micrograph of wood pulp paper fibers

идентифицирована как содержащая значительное количество древесной массы.

После исследования состава бумаги были проведены эксперименты по воздействию лазерного излучения на фоксинги.

При работе с эксимерным лазером выбраны следующие режимы обработки фоксингов:

- для бумаги, содержащей волокна целлюлозы, при влажной лазерной очистке, количество импульсов 150, частота повторений 2 Гц;
- для бумаги, содержащей древесную массу, при сухой лазерной очистке, количество импульсов 30, частота повторений 1 Гц.

При работе с Nd:YAG-лазером на гранате выбраны следующие режимы:

- для бумаги, содержащей волокна целлюлозы, при влажной лазерной очистке, количество импульсов 50, частота повторений 1 Гц;
- для бумаги, содержащей древесную массу, при сухой лазерной очистке, количество импульсов 60, частота повторений 1 Гц.

Предварительные эксперименты по лазерной обработке фоксингов показали, что эффективность их удаления на бумаге, содержащей волокна целлюлозы, оказалась гораздо выше при влажной лазерной очистке, а на бумаге, содержащей древесную массу — при сухой.

Экспериментальным путём было установлено количество импульсов, необходимое для достижения эффекта максимально-эффективного удаления фоксингов.

На первом этапе работы результаты лазерной обработки оценивались визуально. Критерием оценки эффективности лазерной обработки служило полное исчезновение или частичное осветление фоксингов под воздействием излучения лазеров.

Результаты обработки фоксингов при работе с эксимерным лазером CL-7020 показаны на рис. 3 и 4. На приведённых здесь фотографиях показаны фоксинговые пятна, каждое из которых обведено карандашом и имеет собственный номер (аналогичные номера указаны далее в табл. 2–6).

Результаты обработки фоксингов при работе с твердотельным Nd:YAG-лазером показаны на рис. 5 и 6.

На основании визуальной оценки можно сделать вывод о том, что эффективность влажной лазерной очистки бумаги, содержащей волокна целлюлозы, гораздо выше, чем сухой, причём, для бумаги, содержащей древесную массу, предпочтительнее сухая очистка. При этом

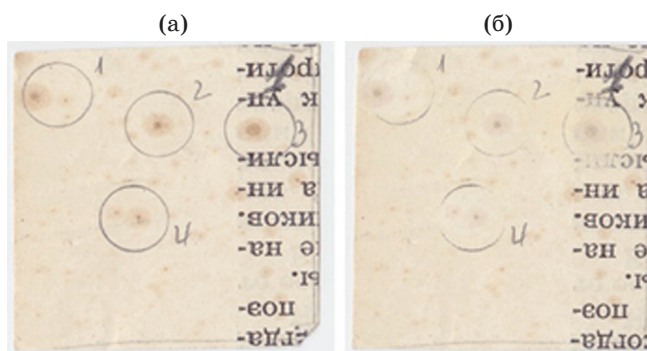


Рис. 3. Результаты влажной очистки образцов бумаги № 1, содержащей целлюлозные волокна, при помощи эксимерного лазера. Образец до очистки (а), образец после очистки (б)

Fig. 3. Results of wet cleaning of paper samples № 1 containing cellulose fibers using an excimer laser. (a) sample before cleaning, (b) sample after cleaning

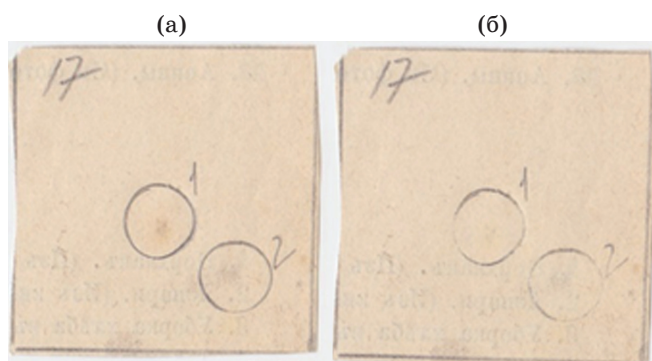


Рис. 4. Результаты сухой очистки образцов бумаги № 2, содержащей древесную массу, при помощи эксимерного лазера. (а) Образец до очистки, (б) образец после очистки

Fig. 4. Results of dry cleaning of samples of paper № 2 containing wood pulp using an excimer laser. (a) sample before cleaning, (b) sample after cleaning

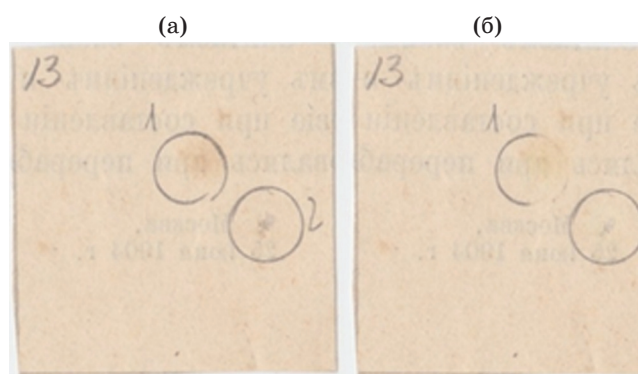


Рис. 6. Результаты сухой очистки образцов бумаги № 2, содержащей древесную массу, при помощи Nd:YAG-лазера. Образец до очистки (а), образец после очистки (б)

Fig. 6. Results of dry cleaning of samples of paper № 2 containing wood pulp using Nd:YAG laser. (a) Sample before cleaning, (b) sample after cleaning

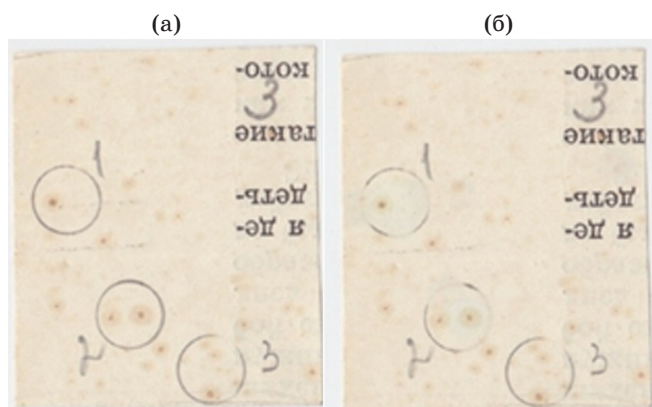


Рис. 5. Результаты влажной очистки образцов бумаги № 1, содержащей целлюлозные волокна, при помощи Nd:YAG-лазера. (а) Образец до очистки, (б) образец после очистки

Fig. 5. Results of wet cleaning of samples of paper № 1 containing cellulose fibers using Nd:YAG laser. (a) sample before cleaning, (b) sample after cleaning

в случае использования эксимерного лазера наблюдается практически полное удаление фоксингов, а при работе с Nd:YAG-лазером полного удаления фоксингов не происходит.

Данные визуальной оценки удаления фоксингов подтверждены инструментальными и расчётными методами, а именно определением значений цветовых коэффициентов a^* , b^* и L^* до и после обработки и расчётом величины общего цветового различия ΔE :

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}.$$

Данные расчёта приведены в табл. 2 и 3. По ним можно сделать следующие выводы. Все обработанные на эксимерном ArF-лазере образцы как бумаги, содержащей в своем составе волокна целлюлозы, так и бумаги, содержащей древесную массу, имеют величину общего цветового различия $1,6 \leq \Delta E \leq 2,1$. Это позволяет сделать вывод о значительном осветлении бумаги в результате удаления фоксингов. Большинство из обработанных Nd:YAG-лазером образцов как из бумаги, содержащей волокна целлюлозы, так и из бумаги, содержащей древесную массу, имеют величину общего цветового различия $1,5 \leq \Delta E \leq 1,9$, что также говорит об осветлении фоксинговых пятен, но в меньшей степени, чем при обработке ArF-лазером. Поскольку величина общих цветовых различий во всех случаях превосходит значение 1,5, то изменения цвета бумаги можно характеризовать как заметные, а, следовательно, лазерную обработку можно оценить, как эффективную, особенно в случае использования эксимерного лазера.

Помимо описанного выше метода анализа изменений цвета фоксинговых пятен, основанного на измерении цветовых характеристик локального участка бумаги, в работе была использована упрощённая аналитическая методика. Она основана на определении разницы цветовой интенсивности анализируемого участка поверхности бумаги до и после его обработки излучением лазера. В телевизионных и дисплейных технологиях цветовую

Таблица 2. Оценка эффективности обработки бумаги эксимерным лазером**Table 2.** Evaluation of the efficiency of paper treatment with an excimer laser

Вид бумаги	№ образца	Вид лазерной очистки	Величина общего цветового различия ΔE
Образцы бумаги группы № 1, содержащей волокна целлюлозы	1-1	Влажная	1,6
	1-2		1,7
	1-3		2,0
	1-4		1,7
	2-1		2,1
	2-2		1,5
	4-1		1,7
	4-2		2,1
Образцы бумаги группы № 2, содержащей древесную массу	16	Сухая	2,0
	17-1		1,8
	17-2		1,8
	18		1,8
	19		1,9

Таблица 3. Оценка эффективности обработки бумаги Nd:YAG-лазером**Table 3.** Evaluation of the efficiency of Nd:YAG laser paper treatment

Вид бумаги	№ образца	Вид лазерной очистки	Величина общего цветового различия ΔE
Образцы бумаги группы № 1, содержащей волокна целлюлозы	3-1	Влажная	1,5
	3-2		1,5
	3-3		1,6
	5		1,6
	6-1		1,6
	6-2		1,8
Образцы бумаги группы № 2, содержащей древесную массу	13-1	Сухая	1,7
	13-2		1,6
	14-1		1,8
	14-2		1,9
	14-3		1,9
	15		1,5

интенсивность характеризуют при помощи параметра эквивалентная интенсивность, который учитывает различную чувствительность зрения человека к различным цветам (красному, синему и зелёному) [28]. Измеряя значения эквивалентной интенсивности фоксинговых пятен до и после лазерной обработки, можно оценить степень их осветления под воздействием излучения лазера. Более под-

робно данная методика описана в работе [29]. Главным её достоинством является простота реализации — для проведения измерений не требуется использование дорогостоящего оборудования.

Следует отметить, что результаты, полученные при помощи этой методики при анализе фоксинговых пятен, находятся в полном соответствии с данными, полученными при помощи

спектрофотометра, а также с визуальной оценкой результатов лазерной обработки фоксингов.

Важный аспект использования лазерной обработки бумаги в реставрации книг и документов — это отсутствие негативных изменений её физико-механических свойств. Эти

вопросы подробно рассмотрены в недавней публикации одного из авторов статьи [21]. В ней показано, что при правильном выборе параметров излучения лазера лазерная обработка не вызывает негативных изменений механической прочности и кислотности бумаги.

Таблица 4. Значение коэффициента изрезанности образцов бумаги до и после обработки эксимерным лазером
Table 4. The value of the coefficient of paper samples roughness before and after excimer laser treatment

Вид бумаги	№ образца	Вид лазерной очистки	Значение коэффициента изрезанности до обработки	Значение коэффициента изрезанности после обработки
Образцы бумаги группы № 1, содержащей волокна целлюлозы	1-1	Влажная	7,1	7,0
	1-2		6,8	6,9
	1-3		7,1	7,0
	1-4		6,4	6,5
	2-1		7,4	7,5
	2-2		8,9	8,1
	4-1		5,1	5,2
	4-2		6,5	6,3
Образцы бумаги группы № 2, содержащей древесную массу	16	Сухая	8,2	8,0
	17-1		5,7	5,7
	17-2		8,0	8,0
	18		7,7	7,8
	19		6,6	6,7

Таблица 5. Значение коэффициента изрезанности образцов бумаги до и после обработки Nd:YAG-лазером
Table 5. The value of the coefficient of paper samples roughness before and after treatment with Nd:YAG laser

Вид бумаги	№ образца	Вид лазерной очистки	Значение коэффициента изрезанности до обработки	Значение коэффициента изрезанности после обработки
Образцы бумаги группы № 1, содержащей волокна целлюлозы	3-1	Влажная	6,6	6,1
	3-2		6,9	6,9
	3-3		6,7	6,4
	5		8,5	8,1
	6-1		5,6	5,6
	6-2		7,6	7,7
Образцы бумаги группы № 2, содержащей древесную массу	13-1	Сухая	7,6	7,8
	13-2		6,8	6,9
	14-1		4,7	4,7
	14-2		8,6	8,8
	14-3		6,9	7,1
	15		8,7	7,9

Таблица 6. Изменение коэффициента отражения образцов с фоксингами после обработки и в процессе искусственного старения

Table 6. Change in the reflection coefficient of samples with foxings after treatment and in the process of artificial aging

Вид бумаги	Вид образца	Коэффициент отражения	Изменение коэффициента отражения после обработки и искусственного старения
Образцы бумаги группы № 1, содержащей волокна целлюлозы	1-1 до обработки	39,49	
	1-1 обработанные	43,37	+10%
	1-1 обработанные после старения	26,43	–34%
	1-2 до обработки	51,64	
	1-2 обработанные	55,18	+7%
	1-2 обработанные после старения	41,21	–20%
	1-3 до обработки	55,96	
	1-3 обработанные после старения	51,93	–7%
	2-1 до обработки	41,28	
	2-1 обработанные	52,39	+27%
	2-1 обработанные после старения	37,43	–10%
	2-2 до обработки	44,15	
	2-2- после старения	42,03	–5%
	2-3 до обработки	46,58	
	2-3- после старения	42,26	–17%
	3-1 до обработки	35,93	
	3-1- после старения	34,26	–5%
	3-2 до обработки	48,34	
	3-2 после старения	30,44	–37%
	4-1 до обработки	41,09	
	4-1 обработанные	44,28	+8%
	4-1- обработанные после старения	24,66	–41%
	4-2 до обработки	54,89	
	4-2 после старения	38,92	–40%
	7-1 до обработки	35,62	
	7-1 обработанные	42,43	+19%
	7-1 обработанные после старения	28,10	–21%
	7-2 до обработки	43,82	
	7-2 обработанные	52,45	+19%
	7-2 обработанные после старения	52,42	+19%
Образцы бумаги группы № 2, содержащей древесную массу	9-1 до обработки	36,70	
	9-1 после старения	32,51	–12%
	14 до обработки	27,29	
	14 обработанные	35,31	+29%
	14 обработанные после старения	27,55	+1%
	16-2 до обработки	28,26	
	16-2 обработанные	31,76	+12%
	16-2 обработанные после старения	23,29	–18%

В работе проводились также исследования важной характеристики бумаги — значения коэффициента изрезанности, характеризующего изменение морфологии поверхности бумаги до и после лазерной обработки. Эти данные приведены в табл. 4 и 5. По ним с достаточной долей уверенности можно утверждать, что значительных изменений в поверхностном слое бумаги после лазерной обработки не зафиксировано.

Об отсутствии механических повреждений бумаги свидетельствуют также и результаты её исследования под микроскопом. На рис. 7 представлены фотографии фрагмента страницы старинной русской рукописной книги XVII в. из тряпичной бумаги до и после обработки эксимерным ArF-лазером, а на рис. 8 — изображение поверхности того же самого бумажного листа с бóльшим увеличением, полученное на оптическом микроскопе Leica DM 2000. Здесь отчётливо видно, что воздействие лазерного излучения не привело к повреждению волокон бумаги.

Следовательно, с учётом всех полученных в данной работе результатов можно сделать вывод о возможности применения лазерного удаления фоксингов при проведении практических работ по реставрации книг и документов.

Из научной литературы по реставрации книг и документов на бумаге известно, что в результате химической обработки удаётся достичь значительного осветления фоксингов на бумаге, а в ряде случаев и их полного удаления. Однако

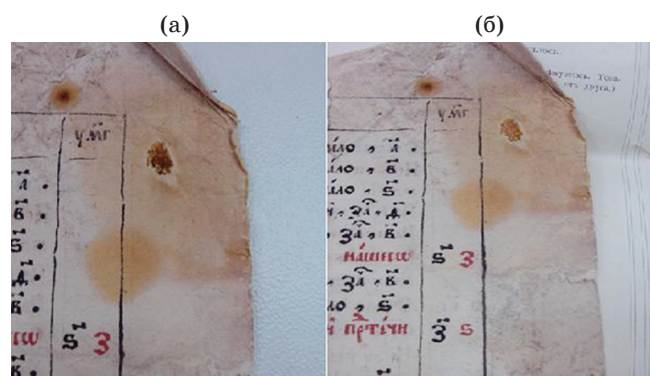


Рис. 7. Фото страницы старинной книги из тряпичной бумаги до и после лазерной обработки.

До обработки (а), после обработки лазером (б)

Fig. 7. Photo of a page of an old rag paper book before and after laser treatment. (a) before processing, (b) after laser treatment

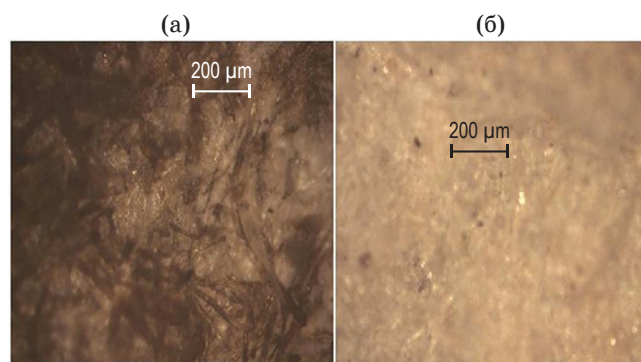


Рис. 8. Макрофотография поверхности фрагмента бумажного листа до обработки (а), после обработки ArF-лазером (а)

Fig. 8. Micrograph of paper sheet fragment surface (a) before treatment, (b) after treatment with an ArF laser

при несоблюдении нормативных параметров условий хранения (температуры и относительной влажности воздуха) или при экспонировании документов (из-за воздействия света) очень часто фоксинги появляются вновь [30].

По этой причине значительный практический интерес представляет изучение влияния лазерной обработки в долгосрочной перспективе. Для проведения такой оценки образцы бумаги с фоксингами (без обработки) были подвергнуты искусственному тепловлажному старению в течение 6-ти суток. По изменению значения коэффициента отражения обработанных и необработанных образцов по отношению к первоначальному значению (до обработки) была сделана попытка оценить эффективность обработки во времени. Полученные данные приведены в табл. 6.

Анализ данных, приведённых в табл. 6, показывает, что в среднем значение коэффициента отражения фоксингов после обработки увеличивается на 18%, т.е. фоксинги значительно осветляются. После искусственного старения среднее значение коэффициента отражения фоксингового пятна снижается на 15%, образца без обработки — на 18%. Таким образом можно сделать вывод, что обработка лазером практически не снижает динамику увеличения интенсивности окраски пятен фоксингов во времени, однако, учитывая тот факт, что лазерная обработка позволяет значительно осветлить фоксинговое пятно, данный способ удаления фоксингов с бумаги

документов можно признать более эффективным по сравнению с методами, обычно применяемым в практике реставрации.

3. ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведённых исследований показали высокую эффективность удаления фоксингов импульсным эксимерным ArF-лазером с длиной волны 193 нм. При этом наилучшие результаты были достигнуты при использовании влажной лазерной обработки в случае бумаги, содержащей волокна древесной целлюлозы, и сухой обработки — для бумаги, содержащей древесную массу. Оптимальными выходными характеристиками данного лазера, которые обеспечивают эффективное удаление/осветление фоксинговых пятен, являются следующие: плотность энергии — 0,21–0,34 Дж/см², частота повторения импульсов — 1–2 Гц, длительность импульса — 10 нс.

Поскольку в большинстве образцов бумаги, обработка которых осуществлялась в ходе экспериментов, фоксинговые пятна присутствовали не только на поверхности, но и окрашивали бумажные листы изнутри, можно предположить, что их удаление при помощи ArF-лазера является результатом преимущественно химических реакций, инициируемых под воздействием его излучения. Здесь следует пояснить, что в основе технологии лазерной очистки лежит эффект фотоабляции, и его главными физическими механизмами являются испарение и механическое отделение частиц загрязняющего вещества с поверхности очищаемого материала [1]. Поскольку лазерная очистка приводит к удалению именно поверхностных загрязнений, очевидно, что удаление/осветление фоксинговых пятен (в том числе, за счёт отбеливания внутренних волокон бумаги) является более сложным физическим процессом, который, по-видимому, основан на комбинации механизмов фотоабляции и химических реакций. При этом можно

предположить, что фотохимические процессы преобладают над другими механизмами при воздействии УФ излучения. Такое предположение основано на том, что в наших экспериментах при удалении фоксингов ArF-лазером не было отмечено механических повреждений бумаги. В то же время, в ходе проведённых экспериментов, а также в работе [10], в которой также использовался Nd:YAG-лазер с длиной волны 532 нм и наносекундной длительностью импульсов, были выявлены повреждения волокон бумаги. Однако вопросы, связанные с физико-химическими механизмами удаления/осветления фоксингов в процессе их лазерной обработки, требует более тщательного исследования, и авторы планируют продолжить исследования в этом направлении.

Говоря о других результатах данной работы, нужно отметить, что в ходе её выполнения была предложена и экспериментально проверена методика количественной оценки эффективности удаления (не обязательно только лазерного) фоксингов, основанная на анализе цифрового оптического изображения исследуемого участка книги или документа до и после его антифоксинговой обработки. Данная методика отличается простотой в использовании и не требует применения дорогостоящего аналитического оборудования.

Очень важным с практической точки зрения результатом работы является то, что была показана высокая эффективность лазерного удаления фоксингов в долгосрочной временной перспективе. Это позволяет говорить о преимуществе лазерной обработки бумажных листов книг и документов с фоксингами по сравнению с традиционными методами реставрации.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что лазерное удаление фоксингов является современным высокоэффективным методом решения сложной задачи в реставрации книг и документов на бумажной основе. Это позволяет рекомендовать данную технологию для проведения практических реставрационных работ в библиотеках и архивах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cooper M. Laser cleaning in conservation: An Introduction. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. 126 p.
2. Lasers in the preservation of cultural heritage. Principles and applications / Fotakis C., Anglos D., Zafiro-

REFERENCES

1. Cooper M. Laser cleaning in conservation: An Introduction. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. 126 p.
2. Lasers in the preservation of cultural heritage. Principles and applications / Fotakis C., Anglos D., Zafiro-

- pulos V. et al. Boca Rayton (USA): CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 364 p.
3. Bertasa M., Korenberg C. Successes and challenges in laser cleaning metal artefacts: A review // *Journal of Cultural Heritage*. 2022. V. 53. P. 100–117. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.10.010>
4. Basso E., Pozzi F., Reiley M.C. The Samuel F. B. Morse statue in Central Park: scientific study and laser cleaning of a 19th-century American outdoor bronze monument // *Heritage Science*. 2020. V. 8(1). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-27617/v3>
5. Melita L.N., Węglowska K., Tamburini D., Korenberg C. Investigating the potential of the Er:YAG laser for the removal of cemented dust from limestone and painted plaster // *Coatings*. 2020. V. 10 (11). P. 1099. <https://doi.org/10.3390/coatings10111099>
6. Petiti Ch., Toniolo L., Gulotta D., Mariani B., Goidanich S. Effects of cleaning procedures on the long-term corrosion behavior of bronze artifacts of the cultural heritage in outdoor environment // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. V. 27 (12). P. 13081–13094. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07814-4>
7. Berthonneau J., Parent Ph., Grauby O., Ferry D., Lafon C., Colombini A., Courtois B., Bromblet Ph. Yellowing of laser-cleaned artworks: Formation of residual hydrocarbon compounds after Nd:YAG laser cleaning of gypsum plates covered by lamp black // *Journal of Cultural Heritage*. 2019. V. 39. P. 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.02.014>
8. Arif S., Kautek W. Laser cleaning of paper: Cleaning efficiency and irradiation dose // *Studies in Conservation*. 2015. V. 60. P. S97–S105. <https://doi.org/10.1179/0039363015Z.0000000000214>
9. Zekou E., Tsilikas I., Chatzitheodoridis E., Serafetinides A. Laser paper cleaning: The method of cleaning historical books // In *Proceedings of the 19th International Conference and School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*. Sozopol, Bulgaria. 5 January 2017. V. 10226. <https://doi.org/10.1117/12.2262426>
10. Balakhnina I.A., Brandt N.N., Chikishev A.Y., Shpachenko I.G. Single-pulse two-threshold laser ablation of historical paper // *Laser Phys. Lett.* 2018. V. 15. P. 065605. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aab94e>
11. Abdel-Maksouda G., Emamb H., Ragab N.M. From traditional to laser cleaning techniques of parchment manuscripts: A review advanced research in conservation science // *Adv. Res. Conserv. Sci.* 2020. № 1. P. 52–76. <https://doi.org/10.21608/arcs.2020.111216>
12. Rebrikova N.L., Manturovskaya N.V. Foxing. A new approach to an old problem // *Restaurator*. 2000. V. 21. P. 85–100. <https://doi.org/10.1515/REST.2000.85>
13. Сапрыкина Н.Н., Кобыякова В.И., Шахмин А.Л. Исследование химических и биологических повреждений бумаги старинных книг методами физико-химического анализа // *Журнал прикладной химии*. 1999. № 12. С. 2063–2066.
14. Meynell G.G., Newsam R.J. Foxing, a fungal infection of paper // *Nature*. 1978. V. 274. P. 466–468. <https://doi.org/10.1038/274466a0>
15. Ребрикова Н.Л. Экстремально ксерофильные грибы, обнаруженные в музеях и библиотеках / Могут ли ксерофилы быть причиной образования фоксингов? // *Реставрация документа: консерватизм и инновации*. 2022. М.: Пашков дом, 2022. С. 135–145.
16. Реставрация произведений графики. М: ВХНРЦ им. И.Ю. Грабаря, 1995.
- pulos V. et al. Boca Rayton (USA): CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 364 p.
3. Bertasa M., Korenberg C. Successes and challenges in laser cleaning metal artefacts: A review // *Journal of Cultural Heritage*. 2022. V. 53. P. 100–117. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.10.010>
4. Basso E., Pozzi F., Reiley M.C. The Samuel F. B. Morse statue in Central Park: scientific study and laser cleaning of a 19th-century American outdoor bronze monument // *Heritage Science*. 2020. V. 8 (1). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-27617/v3>
5. Melita L.N., Węglowska K., Tamburini D., Korenberg C. Investigating the potential of the Er:YAG laser for the removal of cemented dust from limestone and painted plaster // *Coatings*. 2020. V. 10 (11). P. 1099. <https://doi.org/10.3390/coatings10111099>
6. Petiti Ch., Toniolo L., Gulotta D., Mariani B., Goidanich S. Effects of cleaning procedures on the long-term corrosion behavior of bronze artifacts of the cultural heritage in outdoor environment // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. V. 27 (12). P. 13081–13094. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07814-4>
7. Berthonneau J., Parent Ph., Grauby O., Ferry D., Lafon C., Colombini A., Courtois B., Bromblet Ph. Yellowing of laser-cleaned artworks: Formation of residual hydrocarbon compounds after Nd:YAG laser cleaning of gypsum plates covered by lamp black // *Journal of Cultural Heritage*. 2019. V. 39. P. 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.02.014>
8. Arif S., Kautek W. Laser cleaning of paper: Cleaning efficiency and irradiation dose // *Studies in Conservation*. 2015. V. 60. P. S97–S105. <https://doi.org/10.1179/0039363015Z.0000000000214>
9. Zekou E., Tsilikas I., Chatzitheodoridis E., Serafetinides A. Laser paper cleaning: The method of cleaning historical books // In *Proceedings of the 19th International Conference and School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*. Sozopol, Bulgaria. 5 January 2017. V. 10226. <https://doi.org/10.1117/12.2262426>
10. Balakhnina I.A., Brandt N.N., Chikishev A.Y., Shpachenko I.G. Single-pulse two-threshold laser ablation of historical paper // *Laser Phys. Lett.* 2018. V. 15. P. 065605. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aab94e>
11. Abdel-Maksouda G., Emamb H., Ragab N.M. From traditional to laser cleaning techniques of parchment manuscripts: A review advanced research in conservation science // *Adv. Res. Conserv. Sci.* 2020. № 1. P. 52–76. <https://doi.org/10.21608/arcs.2020.111216>
12. Rebrikova N.L., Manturovskaya N.V. Foxing. A new approach to an old problem // *Restaurator*. 2000. V. 21. P. 85–100. <https://doi.org/10.1515/REST.2000.85>
13. Saprykina N.N., Kobayakova V.I., Shakhmin A.L. Investigation of chemical and biological damage to the paper of ancient books by methods of physico-chemical analysis // *Zhurnal Prikladnoy Khimii*. 1999. № 12. P. 2063–2066.
14. Meynell G.G., Newsam R.J. Foxing, a fungal infection of paper // *Nature*. 1978. V. 274. P. 466–468. <https://doi.org/10.1038/274466a0>
15. Rebrikova N.L. Extremely xerophilic fungi found in museums and libraries. Can xerophiles be the cause of the formation of foxings? // *Document Restoration: Conservatism and Innovation 2022*. Moscow: Pashkov house, 2022. P. 135–145.
16. Restoration of graphic works. Moscow: I.E. Grabar VHNRC, 1995. 183 p.

17. Лабораторные методики и технологические инструкции по практической консервации документов. Издание 2-е, исправленное и дополненное. СПб.: ПНБ, 2019. 272 с.
18. Brandt N.N., Chikishev A.Y., Itoh K., Rebrikova N.L. ATR-FTIR and FT Raman spectroscopy and laser cleaning of old paper samples with foxings // *Laser Physics*. 2009. V. 19. № 3. P. 483–492. <https://doi.org/10.1134/S1054660X09030220>
19. Ciofini D., Osticioli I., Micheli S., Montalbano L., Siano S. Laser removal of mold and foxing stains from paper artifacts: preliminary investigation // *SPIE Proceedings*. 2013. V. 9065. <https://doi.org/10.1117/12.2052820>
20. Sarantopoulou E., Samardzija Z., Kobe S., Kollia Z., Cefalas A.C. Removing foxing stains from old paper at 157 nm // *Applied Surface Science*. 2003. V. 208–209. P. 311–316. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)01379-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)01379-X)
21. Parfenov V., Galushkin A., Tkachenko T., Aseev V. Laser cleaning as novel approach to preservation of historical books and documents on a paper basis // *Quantum Beam Science*. 2022. V. 6 (1). P. 23. <https://doi.org/10.3390/qubs6030023>
22. Kolar J., Strlic M., Pentzien S., Kautek W. Near-UV, visible and IR pulsed laser light interaction with cellulose // *Appl. Phys. A*. 2000. V. 71. P. 87–90. <https://doi.org/10.1007/PL00021097>
23. Kolar J., Strlic M., Müller-Hess D., Gruber A., Troschke K., Pentzien S., Kautek W. Laser cleaning of paper using Nd:YAG laser running at 532 nm // *J. Cult. Herit*. 2003. V. 4. P. 185–187. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01196-2](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01196-2)
24. Pilch E., Pentzien S., Madebach H., Kautek W. Antifungal laser treatment of paper: A model study with a laser wavelength of 532 nm / *Lasers in the Conservation of Artworks* // *Springer Proc. Phys.* 2005. V. 100. P. 19–27. https://doi.org/10.1007/3-540-27176-7_3
25. Ciofini D., Osticioli I., Micheli S., Montalbano L., Siano S. Laser removal of mold and foxing stains from paper artifacts: preliminary investigation // *SPIE Proceedings*. 2013. V. 9065. <https://doi.org/10.1117/12.2052820>
26. Michalski S., Gignard C. Ultrasonic misting. Part 1. Experiments on appearance and improvement in bonding // *JAIC*. 1977. V. 36. P. 109–126. <https://doi.org/10.1179/019713697806373208>
27. Исаев Б.Л., Ляховицкий Е.А., Цыпкин Д.О., Чиркова А.В. "VESTIGIUM" — комплекс программного обеспечения для анализа нетекстовой информации рукописных памятников // *Историческая информатика. Информационные технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании*. 2016. № 1–2 (15–16). С. 72–83.
28. Gomes J., Velho L. Image processing for computer graphics. Berlin: Springer Science+Business Media, 1997. 351 с.
29. Титов С.А., Парфенов В.А. Техничко-технологические аспекты лазерной очистки книг и документов на бумажной основе // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2018. № 8. С. 81–86.
30. Подгорная Н.И., Добрусина С.А., Волгушкина Н.С. Удаление фоксингов с бумажных документов: различные методы и оценка результатов // *Фотография. Изображение. Документ / РОСФОТО*. СПб. 2021. Вып. 10. С. 108–112.
17. Laboratory techniques and technological instructions for the practical preservation of documents. 2nd edition, corrected and supplemented. St. Petersburg: Russian National Library, 2019. 272 p.
18. Brandt N.N., Chikishev A.Y., Itoh K., Rebrikova N.L. ATR-FTIR and FT Raman spectroscopy and laser cleaning of old paper samples with foxings // *Laser Physics*. 2009. V. 19. № 3. P. 483–492. <https://doi.org/10.1134/S1054660X09030220>
19. Ciofini D., Osticioli I., Micheli S., Montalbano L., Siano S. Laser removal of mold and foxing stains from paper artifacts: preliminary investigation // *SPIE Proceedings*. 2013. V. 9065. <https://doi.org/10.1117/12.2052820>
20. Sarantopoulou E., Samardzija Z., Kobe S., Kollia Z., Cefalas A.C. Removing foxing stains from old paper at 157 nm // *Applied Surface Science*. 2003. V. 208–209. P. 311–316. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)01379-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)01379-X)
21. Parfenov V., Galushkin A., Tkachenko T., Aseev V. Laser cleaning as novel approach to preservation of historical books and documents on a paper basis // *Quantum Beam Science*. 2022. V. 6 (1). P. 23. <https://doi.org/10.3390/qubs6030023>
22. Kolar J., Strlic M., Pentzien S., Kautek W. Near-UV, visible and IR pulsed laser light interaction with cellulose // *Appl. Phys. A*. 2000. V. 71. P. 87–90. <https://doi.org/10.1007/PL00021097>
23. Kolar J., Strlic M., Müller-Hess D., Gruber A., Troschke K., Pentzien S., Kautek W. Laser cleaning of paper using Nd:YAG laser running at 532 nm // *J. Cult. Herit*. 2003. V. 4. P. 185–187. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01196-2](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01196-2)
24. Pilch E., Pentzien S., Madebach H., Kautek W. Antifungal laser treatment of paper: A model study with a laser wavelength of 532 nm / *Lasers in the Conservation of Artworks* // *Springer Proc. Phys.* 2005. V. 100. P. 19–27. https://doi.org/10.1007/3-540-27176-7_3
25. Ciofini D., Osticioli I., Micheli S., Montalbano L., Siano S. Laser removal of mold and foxing stains from paper artifacts: preliminary investigation // *SPIE Proceedings*. 2013. V. 9065. <https://doi.org/10.1117/12.2052820>
26. Michalski S., Gignard C. Ultrasonic misting. Part 1. Experiments on appearance and improvement in bonding // *JAIC*. 1977. V. 36. P. 109–126. <https://doi.org/10.1179/019713697806373208>
27. Isaev B.L., Lyakhovitsky E.A., Tsyppkin D.O., Chirkova A.V. "VESTIGIUM" — a software package for analyzing non-textual information of handwritten monuments // *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskie metody v istoricheskikh issledovaniyakh i obrazovanii*. 2016. V. 1–2 (15–16). P. 72–83.
28. Gomes J., Velho L. Image processing for computer graphics. Berlin: Springer Science+Business Media, 1997. 351 с.
29. Titov S.A., Parfenov V.A. Technical and technological aspects of laser cleaning of books and documents on a paper basis // *Izvestiya Sankt-Petersburgskogo elektrotekhnicheskogo universiteta "LETI"*. 2018. № 8. P. 81–86.
30. Podgornaya N.I., Dobrusina S.A., Volgushkina N.S. Removal of foxings from paper documents: various methods and evaluation of results // *Fotografia. Izobrazhenie. Dokument / ROSFOTO*. 2021. St. Petersburg. Iss. 10. P. 108–112.

АВТОРЫ

Светлана Александровна Добруссина — доктор техн. наук, доцент, Российская национальная библиотека, 191069, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0001-7505-2767>, sdobrussina@mail.ru

Вадим Александрович Парфенов — доктор техн. наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», 197376, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 56865680900, <https://orcid.org/0000-0002-2048-4677>, vadim_parfenov@mail.ru

Наталья Ивановна Подгорная — главный специалист, Российская национальная библиотека, 191069, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0000-7852-1322>, conservation@nlr.ru

Нина Дмитриевна Самсыгина — магистр, инженер Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», 197376, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0007-3196-9825>, ninel-ovdienko@mail.ru

Сергей Владимирович Титов — преподаватель-исследователь, инженер, ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 194064, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0007-6297-7713>, morterictusgrin@yandex.ru

Андрей Анатольевич Петров — канд. техн. наук, доцент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-2853-6478>, aapetrov@itmo.ru

Владимир Анатольевич Асеев — канд. физ.-мат. наук, доцент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-4098-2136>, aseev@itmo.ru

AUTHORS

Svetlana A. Dobrussina — Dr.Sci., Associate Professor, Russian National Library, 191069, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0001-7505-2767>, sdobrussina@mail.ru

Vadim A. Parfenov — Dr.Sci., Professor, St. Petersburg Electrotechnical University, 197376, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 56865680900, <https://orcid.org/0000-0002-2048-4677>, vadim_parfenov@mail.ru

Natalya I. Podgornaya — Main Specialist, Russian National Library, 191069, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0000-7852-1322>, conservation@nlr.ru

Nina D. Samsygina — Master of Science, Engineer, St. Petersburg Electrotechnical University, 197376, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0007-3196-9825>, ninel-ovdienko@mail.ru

Sergei V. Titov — Master of Science, Engineer, Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, 194064, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0007-6297-7713>, morterictusgrin@yandex.ru

Andrey A. Petrov — PhD, Associate Professor, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2853-6478>, aapetrov@itmo.ru

Vladimir A. Aseev — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4098-2136>, aseev@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 09.04.2023

Одобрена после рецензирования 05.05.2023

Принята к печати 18.08.2023

The article was submitted to the editorial office 09.04.2023

Approved after review 05.05.2023

Accepted for publication 18.08.2023