

А. Д. Неелова, В. А. Парфенов, С. Л. Ронгонен,  
Д. В. Журба, Т. К. Лепехина, В. И. Альмяшев,  
Е. М. Шепилова, Д. В. Сафронов

### **Лазерная реставрационная очистка книг и документов<sup>1</sup>**

Статья посвящена лазерной очистке книг и документов. В данной работе представлены экспериментальные результаты по использованию импульсного волоконного иттербиевого лазера на длине волны 1064 нм для очистки модельных образцов из бумаги, кожи и пергамена, а также подлинных артефактов: старинных книг, фрагментов переплетов и рукописей. Исследованные образцы и артефакты удалось эффективно и бережно очистить от ряда загрязнений, в том числе от биологических, вызванных жизнедеятельностью плесневых грибов. Были применены два метода лазерной очистки – сухой и влажный.

Ключевые слова: лазерная очистка документов; лазерная очистка книг; применение лазеров в реставрации; реставрация книг; реставрация документов

Angelina Neelova, Vadim Parfenov, Sofia Rongonen,  
Danila Zhurba, Tatiana Lepekhina, Vyacheslav Almiyashev,  
Elena Shepilova, Daniil Safronov

### **Laser Restoration Cleaning of Books and Documents**

The article is devoted to laser cleaning of books and documents. This work presents experimental results on the use of a pulsed ytterbium fibre laser at a wavelength of 1064 nm to clean model samples of paper, leather and parchment, as well as genuine artifacts: old books, fragments of bindings and manuscripts. The studied samples and artifacts were effectively and carefully cleaned from a number of contaminants, including biological ones caused by the vital activity of fungi. Two approaches to laser cleaning were used: dry cleaning method and wet cleaning.

**Keywords:** documents laser cleaning; books laser cleaning; laser application in restoration; restoration of books; restoration of documents

#### **Неелова Ангелина Дмитриевна**

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

Аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем (научный руководитель В. А. Парфенов).

Российская национальная библиотека.

Специалист 1-й категории.

Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

E-mail: angelina.neelova@gmail.com

ORCID: 0009-0004-8098-2055; SPIN-код: 5622-6688

**Парфенов Вадим Александрович**

Санкт-Петербургский институт истории Российской академии наук.

Ведущий научный сотрудник.

Санкт-Петербургская академия художеств.

Научный сотрудник.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Профессор кафедры фотоники, профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем.

Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта.

Профессор.

Доктор технических наук.

Россия, 197110, Санкт-Петербург, Петрозаводская ул., 7.

E-mail: vadim\_parfenov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2048-4677; SPIN-код: 3737-1708

**Ронгонен Софья Львовна**

Санкт-Петербургский филиал архива Российской академии наук.

Старший научный сотрудник.

Россия, 196084, Санкт-Петербург, ул. Киевская, 5.

E-mail: sofiaigonobobleva@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8303-7698; SPIN-код: 4580-4905

**Журба Данила Владимирович**

ООО «Научно-производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования».

Младший научный сотрудник.

E-mail: zhurba.danila306@ya.ru

ORCID: 0009-0001-6814-1737; SPIN-код: 3384-9039

**Лепехина Татьяна Константиновна**

Санкт-Петербургский институт истории Российской академии наук.

Младший научный сотрудник.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем.

Россия, 197110, Россия, Санкт-Петербург, Петрозаводская ул., 7.

E-mail: tanialep@mail.ru

ORCID: 0009-0009-8987-4698; SPIN-код: 9860-8725

**Альмяшев Вячеслав Исакович**

Научно-исследовательский технологический институт имени А. П. Александрова.

Начальник отдела исследований тяжелых аварий.

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

Доцент кафедры физической химии.

Кандидат химических наук.

Россия, 18854, Ленинградская обл., Сосновый Бор, Копорское ш., 72.

E-mail: vac@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7376-2263; SPIN-код: 4846-1430

**Шепилова Елена Михайловна**

Санкт-Петербургский институт истории Российской академии наук.

Научный сотрудник, и. о. заведующей лабораторией комплексного исследования рукописных памятников.

Россия, 197110, Санкт-Петербург, Петрозаводская ул., 7.

E-mail: yelena\_sch@mail.ru

ORCID: 0009-0007-8081-4758;

SPIN-код: 8965-2321

### **Сафронов Даниил Валерьевич**

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

Доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем.

ООО «Лазерный центр».

Инженер-конструктор.

Кандидат технических наук.

Россия, 195067, Санкт-Петербург, ул. Маршала Тухачевского, 22.

E-mail: daniilsafronov@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0214-0990; SPIN-код: 1559-6862

### **Neelova Angelina**

St Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Post-graduate student of Laser Measuring and Navigation Systems

Department (academic advisor – Doctor in Technical Sciences, Professor Parfenov V. A.).

The National Library of Russia.

1st category specialist.

Russia, 197022, St Petersburg, ul. Professora Popova, 5.

E-mail: angelina.neelova@gmail.com

ORCID: 0009-0004-8098-2055; SPIN-code: 5622-6688

### **Parfenov Vadim**

Saint Petersburg Institute of History of Russian Academy of Sciences.

Leading researcher.

St Petersburg Repin Academy of Fine Arts.

Researcher of the Scientific Department.

St Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Professor of Laser Measuring and Navigation Systems Department,

Professor of Photonics Department.

Immanuel Kant Baltic Federal University.

Professor.

Doctor in Technical Sciences.

Russia, 197110, St Petersburg, Petrozavodskaya ul., 7.

E-mail: vadim\_parfenov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2048-4677; SPIN-code: 3737-1708

### **Rongonen Sofia**

Archive of St Petersburg Branch of the Russian Academy of Sciences.

Senior Researcher.

Russia, 196084, St Petersburg, Kievskaya ul., 5.

E-mail: sofiagonobobleva@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8303-7698; SPIN-code: 4580-4905

### **Zhurba Danila**

"Scientific Industrial Enterprise of Fiber Optical and Laser Equipment", LLC.

Junior researcher.

Russia, 199034, St Petersburg, 17 Linya VO, 4–6.

E-mail: zhurba.danila306@ya.ru

ORCID: 0009-0001-6814-1737;

SPIN-code: 3384-9039

**Lepekhina Tatiana**

Saint Petersburg Institute of History of Russian Academy of Sciences.

Junior researcher.

St Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Master's Degree student of Laser Measuring and Navigation Systems Department.

Russia, 197110, St Petersburg, Petrozavodskaya ul., 7.

E-mail: tanialep@mail.ru

ORCID: 0009-0009-8987-4698;

SPIN-code: 9860-8725

**Almiashev Vyacheslav**

Alexandrov NITi.

Head of Severe Accident Department.

St Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Associate professor of Physical Chemistry Department.

PhD in Chemistry.

Russia, Leningradskaja obl., Sosnovy Bor, 188540, St Petersburg, Koporskoye sh., 72.

E-mail: vac@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7376-2263; SPIN-code: 4846-1430

**Shepilova Elena**

St Petersburg Institute of History of Russian Academy of Sciences.

Researcher, Acting Head of the Laboratory for Comprehensive Study of Manuscript Artefacts.

Russia, 197110, St Petersburg, Petrozavodskaya ul., 7.

E-mail: yelena\_sch@mail.ru

ORCID: 0009-0007-8081-4758; SPIN-code: 8965-2321

**Safronov Daniil**

St Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Associate professor of Laser Measuring and Navigation Systems Department.

"Laser centre", LLC.

Design engineer.

PhD in Technical Sciences.

Russia, 195067, St Petersburg, ul. Marshala Tukhachevskogo, 22.

E-mail: daniilsafronov@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0214-0990; SPIN-code: 1559-6862

## Введение

В настоящее время применение лазерной техники в области сохранения объектов культурно-исторического наследия представляет собой быстро развивающееся научно-техническое направление. Лазерные технологии являются основой методов интерферометрии, спектроскопии, голографии и 3D-сканирования, широко использующихся для структурной диагностики, определения химического состава и документирования произведений искусства [1; 12].

В области реставрации широкое применение получила технология лазерной очистки [7; 5; 10], позволяющая решать задачи

по удалению природных наслоений и антропогенных загрязнений с поверхности памятников. За сравнительно недолгую историю использования лазерной техники в реставрации, насчитывающую чуть более 50 лет, в большей степени была развита технология очистки объектов культурно-исторического наследия из камня и металла, а использование ее для памятников из органических материалов, таких как бумага, кожа и пергамен, находится пока еще на стадии проведения научно-исследовательских работ. К наиболее многочисленному классу памятников на основе органических материалов относятся книги и документы, лазерной очистке которых посвящена данная работа.

Для очистки бумаги и кожи наиболее часто используется импульсный твердотельный Nd:YAG лазер с длиной волны 1064 нм [9; 13]. Это связано с тем, что бумага и кожа в области длин волн 900–1100 нм имеют высокое значение коэффициента отражения (порядка 80%), что обеспечивает их безопасную очистку [14].

В данной работе представлены экспериментальные результаты по использованию импульсного волоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1064 нм для очистки бумаги, кожи и пергамента. Результаты были получены как для модельных образцов, так и для подлинных артефактов: старинных книг, фрагментов переплетов и рукописей. Исследованные образцы удалось эффективно и бережно очистить от ряда загрязнений, в том числе от биологических, вызванных жизнедеятельностью плесневых грибов. Были применены два метода лазерной очистки: сухой и влажный. Влажная лазерная очистка [7; 10] предполагает смачивание поверхности перед обработкой.

### **1. Оборудование и объекты исследований**

В экспериментах по лазерной очистке использовались модельные образцы, изготовленные из бумаги современного производства, а также произведенной в СССР в последней трети XX в. Модельными образцами кожи служили обрезки кожи, в том числе крупного рогатого скота. Также был использован фрагмент современного пергамента, предназначенного для реставрации.

В ходе работы был исследован ряд различных загрязнений книг и документов, в частности жиросодержащие загрязнения и загрязнения биологического происхождения. На начальном этапе экспериментальных исследований загрязнения имитировали при помощи графитовой и угольной пыли.

Помимо модельных образцов было использовано несколько печатных книг и газет, а также фрагменты книжных переплетов и пергаменных рукописей. Отобранные для экспериментов по лазерной очистке книги включали издания, напечатанные в последней трети XVIII в., в разные десятилетия XIX в. и в первой половине XX в., выпущенные в Европе, Российской империи и Советском Союзе. Также были использованы фрагменты газет времен Великой Отечественной войны, фрагменты кожаного переплета книги XIX в. и фрагменты рукописи, выполненной на пергамене. Часть исследованных артефактов представлена на *ил. 1*.

Предварительно бумага этих книг была исследована на предмет определения состава волокон. Исследованная подборка включала в себя так называемую тряпичную бумагу, бумагу из целлюлозы, а также бумагу из целлюлозы и древесной массы.

Очистка модельных образцов и артефактов была произведена твердотельным импульсным волоконным иттербиевым лазером с длиной волны 1064 нм. Данный лазер является серийно выпускаемым и производится ООО «Лазерный центр» (Санкт-Петербург, Россия). Максимальная выходная мощность лазера составляет 30 Вт; диаметр фокального пятна – около 50 мкм; частота повторения импульсов от 20 до 100 кГц; длительность импульса от 100 до 200 нс. Схематическое изображение лазерной установки представлено на *ил. 2*.

Двухкоординатная сканирующая система позволяет перемещать сфокусированный лазерный пучок с очень высокой скоростью. Блок питания и управления лазером дает возможность регулировать значение скорости сканирования и количество линий сканирования, которые заполняют заданную для обработки область. Скорость сканирования позволяет минимизировать нагрев поверхности и, соответственно, обезопасить материал от негативного термического воздействия.

В данной работе была выбрана скорость сканирования 800 мм/с; количество линий сканирования от 60 л/мм в зависимости от загрязнения.

Для анализа результатов лазерной очистки использовался оптический микроскоп Levenhuk (производитель США), электронно-сканирующий микроскоп Hitachi S-570 (производитель Япония), а также pH-метр для определения кислотности.

## **2. Результаты лазерной очистки модельных образцов**

На предварительном этапе исследований лазером были очищены модельные образцы бумаги, кожи и пергамента от модельных загрязнений. В ходе анализа полученных результатов для разных видов загрязнений выявлены оптимальные значения лазерного излучения, при которых удалось достигнуть удаления загрязнений без повреждения материала образцов. Анализ осуществлялся посредством оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Также было установлено, какая технология очистки (сухая или влажная) позволяет наиболее эффективно удалить то или иное загрязнение.

Во всех случаях оптимальными параметрами лазерного излучения, которые не менялись в процессе очистки, были частота повторения импульсов (20 кГц) и длительность импульса (100 нс). При этом в зависимости от материала и вида загрязнений мощность лазерного излучения варьировалась, причем таким образом, чтобы работа по очистке проводилась при наименьшем значении этого параметра, но таком, который позволял добиться эффективного удаления загрязнений. Оптимальные значения плотности мощности лазера для конкретных случаев очистки представлены в *таблице*.

## **3. Результаты лазерной очистки. Обсуждение полученных результатов**

### *Лазерная очистка бумаги*

На основании результатов, полученных при очистке модельных образцов и позволивших определить оптимальные режимы

лазерного излучения (*см. табл.*), удалось произвести очистку подлинных книг и документов от разнородных загрязнений.

Наиболее распространенное загрязнение книг и документов – въевшаяся пыль. Данный вид загрязнения эффективно и безопасно удаляется при помощи сухой лазерной очистки (*ил. 3*).

Стоит отметить, что сухая лазерная очистка эффективна только для удаления поверхностных загрязнений. Если же загрязнение проникло в структуру бумаги, то целесообразно использовать влажную лазерную очистку. Как видно на *ил. 3*, поверхностные загрязнения были успешно удалены методом сухой лазерной очистки, в то время как загрязнения в более глубоких слоях бумаги, например затеки (*ил. 3б*), были осветлены, но не удалены полностью.

Лазерное удаление биогенных повреждений с поверхности книг и документов является актуальной, но к настоящему времени малоизученной проблемой. В научной литературе представлено очень мало работ, посвященных лазерной инактивации микроорганизмов – биодеструкторов памятников [2; 3; 4; 8; 11; 15].

При удалении микромицетов и следов пигментации от них были получены схожие результаты. На *ил. 4* представлен результат очистки пигмента неизвестного плесневого гриба. При очистке пятно заметно посветлело, но прежний оттенок бумаги не возвратился.

Для очистки жиросодержащих загрязнений, таких как масло или воск, наиболее часто встречающихся на книгах и документах религиозного содержания, использование сухой лазерной очистки оказалось невозможным, так как в этом случае наблюдались повреждения бумаги, а именно отслоение волокон. Успешное удаление жиросодержащих загрязнений без повреждения материала удалось достичь с помощью влажной очистки (*ил. 5*). В качестве вспомогательной жидкости был использован 5%-й раствор гидрокарбоната натрия ( $\text{NaHCO}_3$ ). Безопасность данного метода очистки бумаги была подтверждена с помощью сканирующей электронной микроскопии. На СЭМ-изображениях отчетливо виден загрязняющий слой между волокнами (*ил. 6*), который был удален после очистки, но при этом на всех изображениях после очистки не наблюдается никаких структурных повреждений материала.



Таблица

**Параметры лазерного излучения для разных материалов  
и видов загрязнений**

Материал	Вид загрязнения	Технология очистки	Параметры лазера
			Плотность мощности ( $\times 10^5$ , Вт/см <sup>2</sup> )
Бумага	Модельные загряз- нения	сухая	1,6–3,2
	Пылевые загряз- нения	сухая	1,6–3,2
	Масло	влажная	2
	Воск	влажная	2
	Микромицеты	влажная	4
Кожа	Модельные загряз- нения	сухая	1,6–3,2
	Пылевые загряз- нения	сухая	1,6–3,2
	Микромицеты	влажная	4
Пергамен	Модельные загряз- нения	сухая	2
	Пылевые загряз- нения	сухая	2

Стоит отметить, что при очистке печатных или рукописных книг и документов необходимо прибегать к так называемой селективной очистке: исключать области текста и рисунки из зоны обработки, поскольку обычно чернила и типографская краска сильно поглощают лазерное излучение и могут быть повреждены в ходе обработки [8].

Исследование кислотности бумаги (pH) до и после лазерного излучения при помощи pH-метра методом холодной экстракции [6] показало, что лазерное излучение не изменяет кислотность бумаги. Напротив, имеет место незначительное изменение значения pH

в сторону нейтрального. С учетом того, что в наших предыдущих работах проводились исследования влияния лазерного излучения на механические свойства бумаги и не было обнаружено их негативного изменения [14], можно сделать вывод, что лазерная обработка является эффективным и безопасным способом удаления загрязнений со страниц книг и документов на бумажной основе.

#### *Лазерная очистка кожи и пергамента*

Лазерная очистка кожи фрагмента исторического переплета книги XIX в. (ил. 7) от въевшихся пылевых загрязнений была произведена сухим способом. В ходе обработки коже был возвращен изначальный оттенок. Анализ результатов на СЭМ подтвердил отсутствие повреждений материала (ил. 8).

Для исследования возможности очистки кожи от биологических загрязнений модельные образцы из кожи крупного рогатого скота размером 20×20 мм были предварительно искусственно заражены спорами микромицета *Aspergillus niger*, а затем помещены в агаризованную питательную среду Чапека – Докса, где хранились в течение 1–2 недель, чтобы мицелий гриба мог вырасти на поверхности материала образцов. После этого образцы были обработаны при помощи лазера. Лазерная обработка позволила одновременно решить две задачи – инактивацию грибов и удаление мицелия гриба с поверхности кожи. Контроль эффективности инактивации микромицета производился путем повторного помещения образцов в питательную среду, где они выдерживались также в течение 1–2 недель. При этом повторный рост микромицета не наблюдался. Анализ поверхности кожи после очистки с использованием оптического микроскопа показал эффективность и безопасность лазерной обработки, так как можно было наблюдать, что мицелий и споры микромицета были удалены без видимых повреждений поверхности материала (ил. 9). Несмотря на отмеченные позитивные результаты по удалению биопоражений, они являются предварительными и требуется проведение дальнейших, более глубоких исследований.

Для контроля безопасности лазерной очистки также были проведены измерения показателя кислотности (pH) образцов кожи методом холодной экстракции. В результате установлено, что

происходит частичная нейтрализация материала, как это наблюдалось и с бумагой. Так, показатель pH фрагмента корешка книги XIX в. в исходном состоянии на незагрязненном участке был равен 3,47, pH фрагмента, очищенного от загрязнения лазером, – 3,70. Поскольку различие в значениях pH невелико, можно сделать вывод о безопасности использования лазера для реставрации предметов культурно-исторического наследия из кожи.

Однако стоит отметить, что необходимо учитывать особенность очищаемого материала, заключающуюся в наличии пор, иногда довольно глубоких, в результате чего очистка может оказаться непростой задачей. В этих случаях имеет смысл использовать либо влажную очистку, либо варьировать положение фокальной плоскости с учетом глубины пор.

Также в ходе экспериментов был очищен фрагмент рукописи на основе пергамена от следов въевшейся пыли (*ил. 10*). На основании анализа очищенной поверхности, проведенного с помощью оптического микроскопа, результаты очистки можно оценить как положительные ввиду отсутствия видимых повреждений при заметном освещении обработанной области.

### Заключение

На основе полученных в данной работе результатов можно сделать вывод о том, что лазерная очистка при помощи твердотельного волоконного иттербиевого лазера на длине волны 1064 нм является безопасным и эффективным способом реставрации книг и документов из различных органических материалов, к которым относятся бумага, кожа и пергамен. Было показано, что при помощи одной и той же лазерной установки можно очистить книгу или документ целиком, то есть и бумажный или пергаменный блок, и переплет. За счет использования сухой и влажной лазерной очистки можно удалять различные виды загрязнений, в том числе жиросодержащих и биогенных. Однако стоит отметить, что при реставрации рукописных документов, которые содержат чернила с высоким коэффициентом поглощения на длине 1064 нм, необходимо использовать селективную очистку. В заключение стоит

отметить, что для более глубокого понимания процессов взаимодействия лазерного излучения с органическими материалами и разработки методологии проведения такого рода работ необходимо проведение дальнейших экспериментальных исследований.

#### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Авторы благодарят лабораторию электронной микроскопии СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и лично зав. кафедрой ЭПУ Н. Н. Потрахова за помощь в организации проведения физико-химического анализа.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. *Асмус Дж., Парфенов В. А.* Лазерные и оптико-электронные методы документирования, анализа и создания копий произведений искусства. СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 160 с. ISBN: 978-5-7629-2020-9; EDN: YASYGT
2. *Болдина О. Н., Геращенко А. Н., Парфенов В. А.* Удаление биологических загрязнений с поверхности памятников из камня при помощи лазерной обработки (лазерное удаление микроскопических водорослей) // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 10. С. 66–73. EDN: VNZBZL
3. *Геращенко А. Н., Кирцидели И. Ю., Парфенов В. А.* Удаление биологических загрязнений с поверхности памятников из камня при помощи лазерной обработки (лазерная очистка мрамора и известняка от микроскопических грибов: практические аспекты) // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 9. С. 48–53. EDN: XDZAEJ
4. *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) // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 6. С. 79–86. EDN: WBORBT
5. *Климук Е. А., Трощиненко Г. А., Фомин В. М.* Удаление свечной копоти и поверхности покровного лака с поверхности масляной живописи с помощью фтороводородных лазеров // Успехи прикладной химии. 2019. Т. 7. № 3. С. 309–318. EDN: QSKCVV
6. *Мамаева Н. Ю., Великова Т. Д.* Инструкция по измерению pH бумаги контактным методом // Лабораторные методики и технологические инструкции в консервации документов. СПб. : РНБ, 2016. С. 213–219. EDN: YSBXAN
7. *Парфенов В. А.* Лазерная очистка памятников истории и культуры. СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с. ISBN: 978-5-7629-1683-7; EDN: YASYHJ
8. *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. EDN: YNMJWH
9. *Arif S., Kautek W.* Laser Cleaning of Paper: Cleaning Efficiency and Irradiation Dose // Studies in Conservation. 2015. V. 60. P. 97–105. DOI: 10.1179/0039363015Z.000000000214; EDN: VFPUDZ

10. *Cooper M.* Laser Cleaning in Conservation: An Introduction. Oxford : Butterworth Heinemann, 1998.

11. *Ciofini D., Osticioli I., Micheli S., Montalbano L., Siano S.* Laser Removal of Mold and Foxing Stains from Paper Artifacts: Preliminary Investigation // *Fundamentals of Laser-Assisted Micro-and Nanotechnologies* 2013. SPIE, 2013. V. 9065. P. 306–316. DOI: 10.1117/12.2052820; EDN: SOSBJT

12. *Fotakis C., Anglos D., Zafiropulos V., Georgiou, S., Tornari V.* Lasers in the Preservation of Cultural Heritage: Principles and Applications. CRC Press, 2006. DOI: 10.1201/9780367800857

13. *Kautek W., Pentzien S.* Laser Cleaning System for Automated Paper and Parchment Cleaning // *Lasers in the Conservation of Artworks: LACONA V Proceedings*. Springer Berlin Heidelberg. 2005. V. 100. P. 403–410. DOI: 10.1007/3-540-27176-7\_51

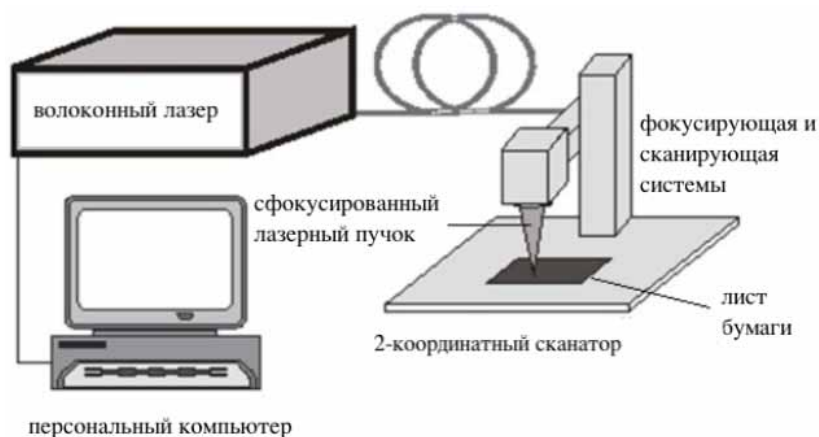
14. *Parfenov V., Galushkin A., Tkachenko T., Aseev V.* Laser Cleaning as a Novel Approach to Preservation of Historical Books and Documents on a Paper Basis // *Quantum Beam Science*. 2022. Vol. 6. № 3. P. 23. DOI: 10.3390/qubs6030023; EDN: CMGCWN

15. *Rosati C., Ciofini D., Osticioli I., Giorgi R., Tegli S., Siano S.* Laser Removal of Mold Growth from Paper // *Applied Physics A*. 2014. V. 117. P. 253–259. DOI: 10.1007/s00339-014-8507-z EDN: UQBKGV

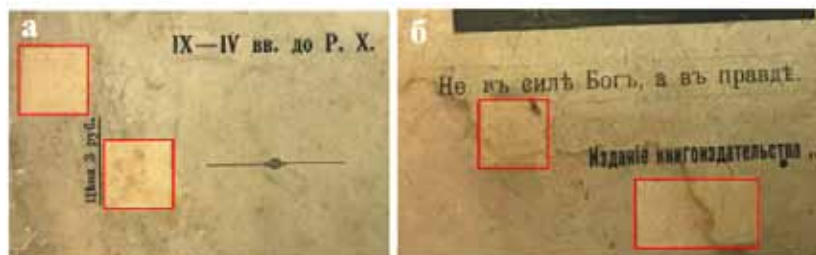


1. Объекты исследования:

- а – Сонеты Франческо Петрарки (1778);
- б – «История Греции в классический период. IX–IV века до Рождества Христова», Р. Виппер (1913);
- в – Сборник сочинений Ф. М. Достоевского (1866);
- г – фрагмент переплета книги (XIX в.)



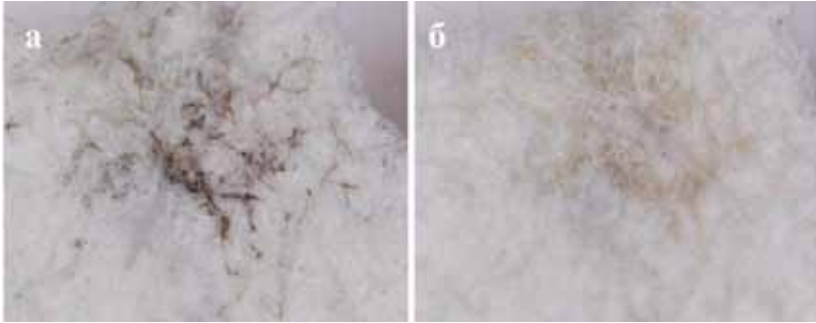
2. Блок-схема лазерной установки



3. Лазерная очистка книг от пылевых загрязнений по сухому методу (очищенная область обозначена красным):

а – «История Греции в классический период. IX—IV века до Рождества Христова», Р. Виппер (1913);

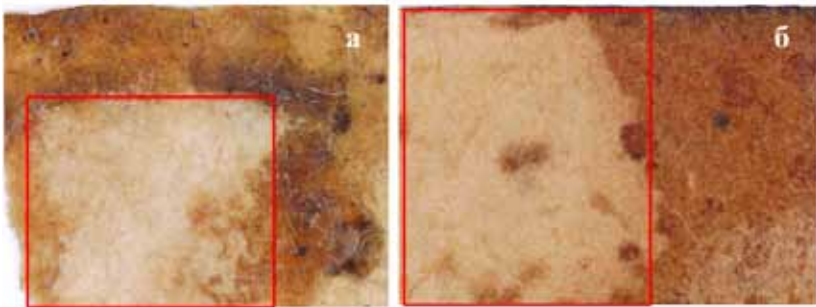
б – брошюра «Для чего мы живем?», Л. Толстой (1906)



4. Изображение фрагмента бумаги начала XX в. со следами пигментации от неизвестного микроскопического гриба, полученное с помощью оптического микроскопа (20-кратное увеличение):

*а* – до лазерной очистки;

*б* – после лазерной очистки

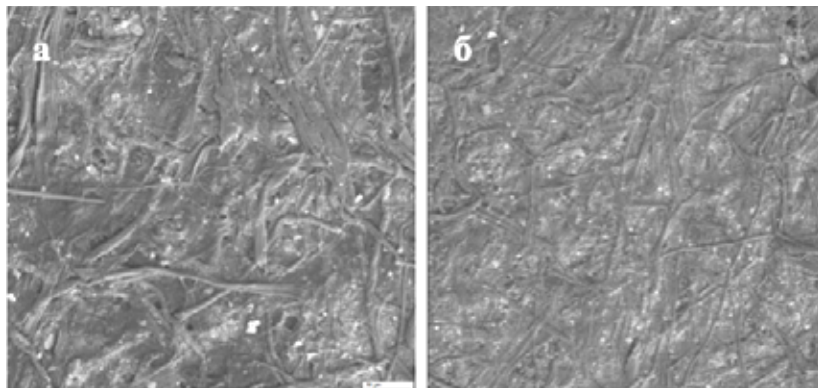


5. Снимки оптического микроскопа (20-кратное увеличение) фрагментов книги XIX в. после влажной лазерной очистки:

*а* – от воска;

*б* – от лампадного масла

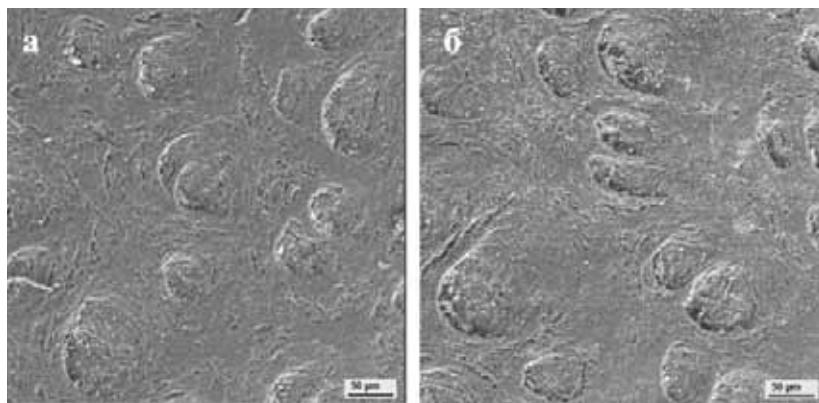




6. СЭМ-изображения фрагмента книги XIX в.  
с жиросодержащими загрязнениями:  
*а* – до лазерной очистки;  
*б* – после влажной лазерной очистки



7. Фрагмент кожаного переплета книги XIX в.  
после сухой лазерной очистки



8. СЭМ-изображения фрагмента кожного переплета книги XIX в. после лазерной очистки

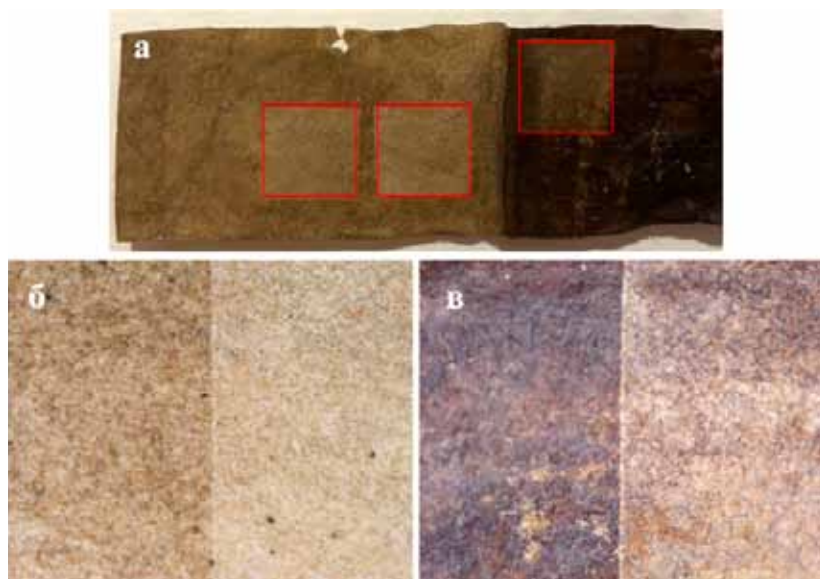


9. Снимок оптического микроскопа фрагмента кожи, зараженного микромицетом *Aspergillus niger*:

*a* – образец до заражения;

*б* – зараженный образец до лазерной очистки;

*в* – после лазерной очистки



10. Фрагмент рукописи на пергамене после лазерной очистки:  
*а* – общий вид (очищенные области выделены красным);  
*б* – снимок оптического микроскопа светлого участка пергамена (20-кратное увеличение, слева – изначальное состояние, справа – после очистки);  
*в* – снимок оптического микроскопа темного участка пергамена (20-кратное увеличение, слева – изначальное состояние, справа – после очистки)