

УДК 621.397

Диагностика состояния предметов станковой темперной живописи методом оптической когерентной томографии высокого разрешения

© 2021 г. **М. А. Волинский***, канд. техн. наук; **Е. С. Гладкова****;
И. П. Гуров*, доктор техн. наук; **Е. В. Жукова***, канд. техн. наук;
Н. Б. Маргарянц*, канд. техн. наук; **С. В. Сирро****;
П. С. Скаков*, канд. техн. наук

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**Государственный Русский музей, Санкт-Петербург

E-mail: gurov@mail.ifmo.ru

Поступила в редакцию 11.05.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-08-40-47

Рассмотрены особенности применения метода оптической когерентной томографии для исследования состояния ценных предметов живописи. Приведено описание оптико-электронной системы полного поля для определения внутренней микроструктуры неоднородных сред с высоким разрешением и быстродействием при использовании алгоритма адаптивной фильтрации Винера для динамической обработки сигналов в оптической когерентной томографии во временной области. Представлены примеры определения особенностей микроструктуры старинного предмета станковой темперной живописи, в частности, толщины лакового слоя и характера кракелюра в нём, морфологии поздней записи авторского слоя и утраты лакокрасочного слоя в результате растрескивания, с целью определения степени сохранности предмета искусства.

Ключевые слова: станковая темперная живопись, неразрушающие исследования, оптическая когерентная томография, огибающая интерференционных полос, фильтрация Винера.

Коды OCIS: 180.3170, 110.4500, 070.2025.

ВВЕДЕНИЕ

Для многих областей науки и современных технологий необходима информация о микроструктуре исследуемых объектов. Один из современных подходов к изучению внутренней микроструктуры многослойных и случайно-неоднородных сред состоит в использовании неразрушающих методов оптической когерентной томографии (ОКТ) [1, 2]. При этом обеспечивается наиболее высокая разрешающая способность (на уровне микрон) как в плоскости наблюдения, так и по глубине проникновения оптического излучения в диапазоне до сотен микрон (единиц милли-

метров) в зависимости от оптических свойств исследуемого материала.

В частично прозрачных образцах излучение проникает в образец, при этом оказывается возможным определение степени отражения излучения по глубине образца с получением информации о его внутренней микроструктуре. Для восстановления микроструктуры образец размещают в измерительном плече интерферометра с частично когерентным освещением и осуществляют сканирование образца по глубине с последовательным получением информации от слоев среды, имеющих толщину, определяемую длиной когерентно-

сти излучения. Данный принцип составляет основу метода ОКТ во временной области, особенности реализации которого подробно рассмотрены в работах [3, 4].

В работе [5] показано, что метод ОКТ во временной области имеет преимущество в информационной пропускной способности при восстановлении трёхмерной микроструктуры объектов по сравнению с методами ОКТ в спектральной области. Данное преимущество достигается за счёт использования микрообъективов с большой числовой апертурой, что обеспечивает высокое разрешение в плоскости наблюдения [4]. Однако для реализации данного преимущества требуется повышение пропускной способности электронного канала системы, то есть частоты регистрации видеок кадров, и использование высокопроизводительных алгоритмов обработки последовательности видеок кадров в динамическом режиме.

Неразрушающие методы ОКТ позволяют изучать объекты, обладающие исторической, художественной и музейной ценностью (см., например, [6]). При этом проводятся реконструкция, анализ и представление объёмных изображений исследуемых участков объекта с многослойной (неоднородной) структурой или элементов структуры при визуализации микрообъёма на наблюдаемом участке. Получаемые сведения исключительно важны при классификации дефектов (см., например, [7]), определении состояния ценных предметов искусства, выборе методики их реставрации и консервации.

Следует отметить дополнительное преимущество систем ОКТ с полным полем наблюдения, заключающееся в перераспределении мощности зондирующего излучения по площади наблюдаемого участка, что значительно снижает плотность мощности по сравнению с методами спектральной ОКТ со сканированием объекта сфокусированным пучком, когда полная мощность концентрируется в точке фокусировки. Локальное воздействие излучения с высокой плотностью мощности, даже кратковременное, нежелательно и в ряде случаев не допускается при исследовании ценных предметов культурного наследия.

В настоящей работе рассматриваются возможности применения и особенности реализации метода ОКТ полного поля во временной

области с повышенным быстродействием для неразрушающего изучения ценных предметов станковой темперной живописи. Представлены результаты экспериментальных исследований образца живописи с определением и визуализацией дефектов микроструктуры объекта. В частности, показаны примеры определения толщины лакового слоя и характера кракелюра в нём, морфологии поздней записи авторского слоя, а также исследование живописного образца в области утраты лакокрасочного слоя в результате растрескивания с целью определения степени сохранности предмета искусства.

СИСТЕМА ОКТ ПОЛНОГО ПОЛЯ И АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВИДЕОКАДРОВ

Система ОКТ полного поля построена на основе оптической схемы микроинтерферометра Линника (рис. 1) с частично когерентным освещением, сочетающего интерферометр и микроскоп с заданным увеличением.

Оптико-механические элементы ОКТ-системы установлены на виброизоляционном оптическом столе 1 и закреплены на штативе 2. Исследуемый объект расположен на устройстве вертикального перемещения 3 (модель М-501, Physik Instrumente, Германия), осуществляющем вертикальное сканирование объекта с заданной скоростью. Интерферометр освещается источником излучения малой когерентности 4 с повышенной мощностью (до десятков мВт) с элементами охлаждения и термоизоляции (в рассматриваемых далее экспериментальных исследованиях использовался источник ELSW-R11E1-0LPNM-AD3D8, EVERLIGHT Europe GmbH, Германия). Излучение источника при помощи светоделителя 5 направляется в измерительное плечо интерферометра для освещения объекта и в опорное плечо, в котором расположен опорный отражатель 7. В плечах интерферометра размещены микрообъективы 6 (5^{\times} , АО «ЛОМО», Россия) с идентичными характеристиками, что снижает влияние аберраций. Излучение на выходе интерферометра через проекционный объектив 8, позволяющий установить требуемую степень увеличения изображения наблюдаемого участка, направляется на видеокамеру 9 (использовалась монохромная

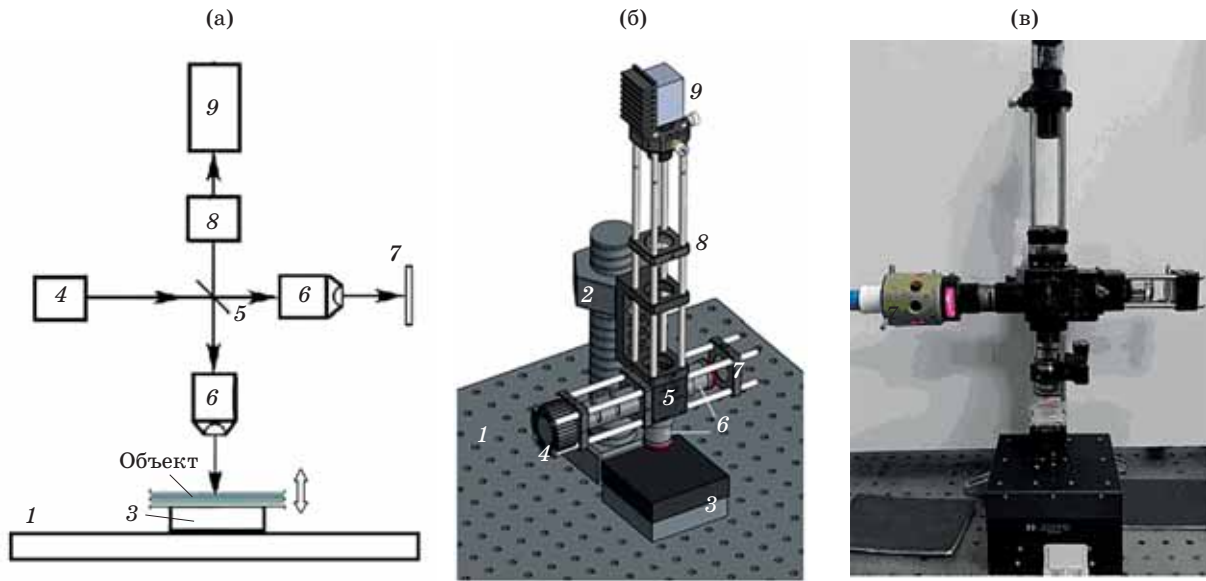


Рис. 1. Система ОКТ полного поля: оптическая схема (а) и общий вид (б, в). 1 — оптический стол, 2 — штатив, 3 — микропозиционер для вертикального перемещения объекта, 4 — источник излучения с конденсором, 5 — светоделитель, 6 — микрообъективы, 7 — опорный отражатель, 8 — проекционный объектив, 9 — видеокамера.

КМОП-видеокамера UI-3060CP, Imaging Development Systems GmbH, Германия).

Регистрация видеокадров осуществляется в асинхронном режиме, при котором скорость вертикального непрерывного сканирования объекта и частота записи видеокадров устанавливаются независимо друг от друга. Данное решение упрощает алгоритм управления системой и процессом записи видеокадров, позволяет устанавливать заданную частоту дискретизации интерференционных полос и время накопления при регистрации видеокадров. Однако асинхронный режим требует использования специального алгоритма обработки данных с определением локального шага дискретизации интерферометрических сигналов по фазе при высоком быстродействии.

Набор видеокадров, представляющих собой значения интенсивности излучения на выходе интерферометра, преобразованные видеокамерой в фотоэлектрические сигналы, определяется моделью

$$s(i, j, k) = a(i, j, k) \cos[\gamma k + \varphi(i, j, k)] + b(i, j, k), \quad (1)$$

где $s(i, j, k)$ — значения сигнала, $a(i, j, k)$, $\varphi(i, j, k)$ и $b(i, j, k)$ — огибающая, фаза и фо-

новая составляющая интерференционных полос частичной когерентности, γ — шаг дискретизации сигнала по фазе, (i, j) обозначают пиксел с дискретными координатами $x_i = i\Delta x$, $y_j = j\Delta y$, Δx и Δy — шаги пикселов, $k = 0, \dots, K - 1$ — номер видеокадра. При исследовании микроструктуры неоднородных объектов все три параметра a , φ , b непостоянны и определяются пространственной изменчивостью исследуемой микроструктуры.

Сигнал от отдельного пиксела (i, j) видеокамеры по последовательности видеокадров в соответствии с (1) определяется выражением

$$s(k) = a(k) \cos[\gamma k + \varphi(k)] + b(k), \quad (2)$$

где $k = 0, \dots, K - 1$ — дискретные значения аргумента для аксиального направления по глубине $z_k = k\Delta z$, Δz — шаг дискретизации, который можно принять равным единице без потери общности рассмотрения. Сигнал (2) содержит полезную интерференционную составляющую в первом слагаемом и неинформативную фоновую составляющую, которая может значительно изменяться в процессе сканирования объекта по глубине ввиду различной степени отражения, рассеяния

на неоднородностях и поглощения излучения. Огибающая $a(k)$ интерференционной составляющей изменяется в соответствии со степенью отражения излучения по глубине исследуемой среды. Особенности формирования, регистрации и дискретной обработки интерферометрических сигналов частичной когерентности подробно рассмотрены в публикации [8].

Для обработки многомерных сигналов видеокамеры использован алгоритм дискретной адаптивной фильтрации Винера, подробно рассмотренный в публикациях [8, 9]. Алгоритм основан на вычислении динамических оценок параметров сигнала (2) с использованием локальных значений весовых коэффициентов фильтра Винера, автоматически настраиваемых при сканировании объекта по критерию минимума дисперсии ошибки по отношению к опорному сигналу, который формируется с учётом значений входного сигнала, включая оцениваемое фактическое значение локального шага дискретизации сигнала по фазе. Как показано в [8, 9], алгоритм обеспечивает эффективное устранение фоновой составляющей $b(k)$ в сигнале (2) и получение оценок огибающей $a(k)$ с разрешением, определяемым оптической системой интерферометра. Алгоритм обладает высоким быстродействием, значительно превышающим скорость записи видеокадров и ввода данных в вычислительную систему.

На рис. 2 представлен пример исходного сигнала, полученного при исследовании лакового слоя на поверхности предмета живописи и соответствующего модели (2), и результат оценивания его огибающей $a(k)$ с помощью алгоритма на основе адаптивной фильтрации Винера. Рис. 2б иллюстрирует А-скан, то есть распределение относительного коэффициента отражения по глубине объекта в одной из точек в плоскости объекта. Полуширина представленных огибающих соответствует разрешающей способности системы по глубине в соответствии с длиной когерентности источника излучения. Для используемого в системе красного светодиода с центральной длиной волны 668 нм и шириной спектра 27 нм длина когерентности (аксиальная разрешающая способность разработанной ОКТ-системы) составляет 7,3 мкм.

Следует отметить, что получение результатов происходит весьма быстро: за время примерно 10 с (для частоты 600 кадров/с) осуществляется регистрация сигналов трёхмерной томограммы при размере кадра 800×800 пикселей и глубине сканирования до 0,5 мм. Последующая обработка данных объёмом порядка 4 гигапикселей проводится на графическом процессоре за время не более 0,5 с, следовательно, быстродействие алгоритма значительно превышает скорость записи данных.

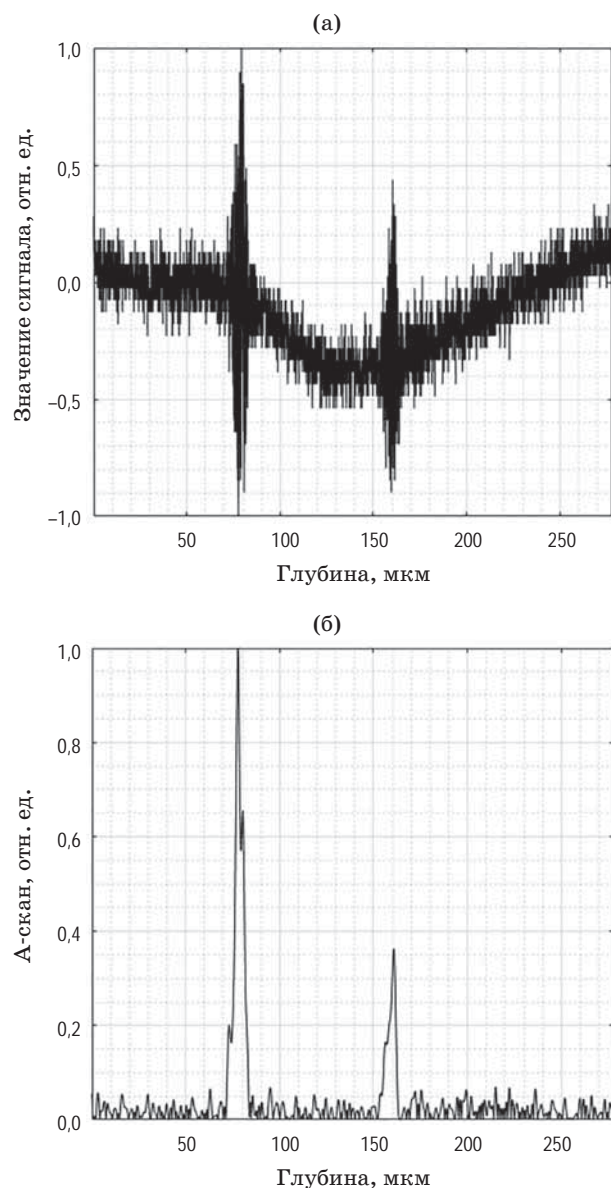


Рис. 2. Пример исходного сигнала (а) и полученного из него А-скана (б).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве исследуемого объекта была выбрана икона «Спас Вседержитель», созданная в середине XIX века и являющаяся характерным образцом предметов станковой темперной живописи. На рис. 3 представлены общий вид иконы и её увеличенный фрагмент с отмеченными областями исследования. Размеры областей соответствуют полю зрения разработанной ОКТ-системы и составляют $1,2 \times 1,2 \text{ мм}^2$. В верхней части фрагмента иконы присутствует область авторской живописи, а в нижней — область поздней записи с перегрунтовкой. В областях 1 и 2 расположена авторская живопись с лаковой плёнкой, в области 3 — слой, видимый в утрате записи (предположительно, загрязнения), лежащий на авторском красочном слое, а область 4 содержит край утраты авторского грунта с красочным слоем с трещиной.

Исследования областей 1 и 2 позволили выявить особенности структуры лакового слоя, что крайне важно для определения со-

хранности старинного произведения (рис. 4). На трёхмерных томограммах (рис. 4а, 4в) хорошо виден кракелюр (трещины) в лаковом слое, причём глубина и геометрия повреждений в областях 1 и 2 различны. Так, в области 1 при толщине лакового слоя примерно 65 мкм наблюдаются редкие неглубокие трещины (примеры отмечены стрелками на рис. 4б) глубиной около 30 мкм. Такое наблюдение позволяет сделать вывод о том, что слой авторской живописи не повреждён. В отличие от области 1, в области 2 при немного меньшей толщине слоя лака (около 50 мкм) наблюдаются множественные глубокие трещины, достигающие до живописного слоя (примеры отмечены стрелками на рис. 4г), что говорит о возможных повреждениях авторской живописи.

Более сложный участок (область 3 на рис. 3) показан на рис. 5. В область исследования попадает слой, видимый в утрате записи, лежащий на авторском слое. На рис. 5б в отмеченной овалом области видна поверхность авторского слоя под слоем записи. Перепад высот

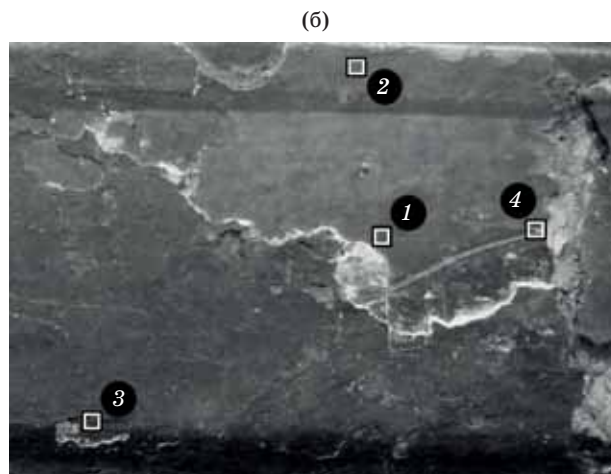
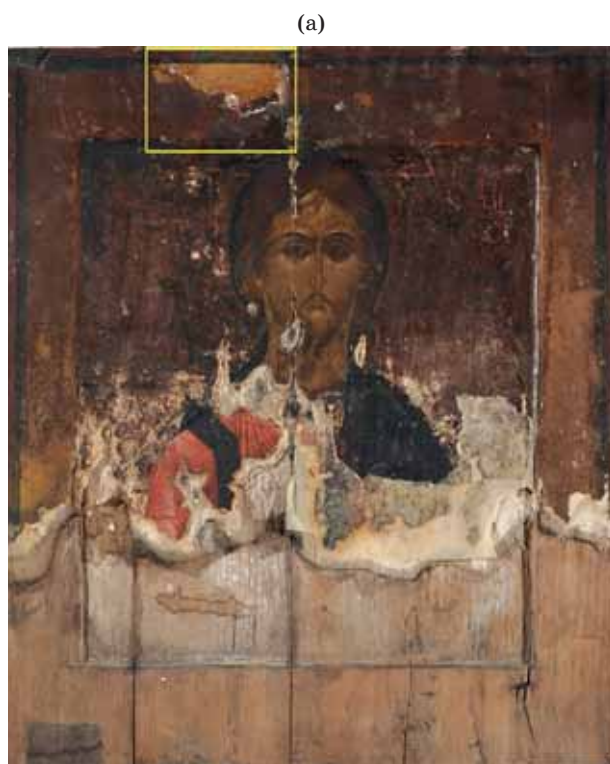


Рис. 3. Фотография иконы «Спас Вседержитель» (середина XIX века) (а) и увеличенный фрагмент иконы, выделенный жёлтым прямоугольником на иконе, с отмеченными областями исследования (б). Размер иконы составляет $29,2 \times 34,5 \text{ см}^2$.

между этими слоями показан овалом 2 на рис. 5в. В различных местах исследуемого участка он составляет от 50 до 70 мкм. И на поверхности авторского слоя, и на поверхности записи видны загрязнения (отмечены овалами 1, 3, 4 на рис. 5в) толщиной 30–40 мкм, связанные, вероятно, с присутствием клея. На рис. 5г овалом отмечена область, в которой хорошо различим слой тонкого авторского лака (20–26 мкм), который и по толщине, и по свойствам существенно отличается от лака, показанного на рис. 4, что говорит о хорошей сохранности авторского слоя под слоем записи в исследуемой области.

На рис. 6 показан фрагмент авторского грунта с лаковым и красочным слоями и глубокой трещиной в грунте. На В-скане хорошо виден слой лака (отмечен овалом 1 на рис. 6б) толщиной около 50 мкм, слой тонкого прозрачного авторского лака (отмечен овалами 2 и 4 на рис. 6б) толщиной 20–25 мкм, сопоставимым по толщине и прозрачности со слоем лака, показанным на рис. 5г в области 3 (рис. 3). Также можно оценить глубину трещины в грунте (отмечена овалом 3 на рис. 6б), которая составляет 90–100 мкм относительно уровня грунта и 260 мкм относительно верхнего лакового слоя.

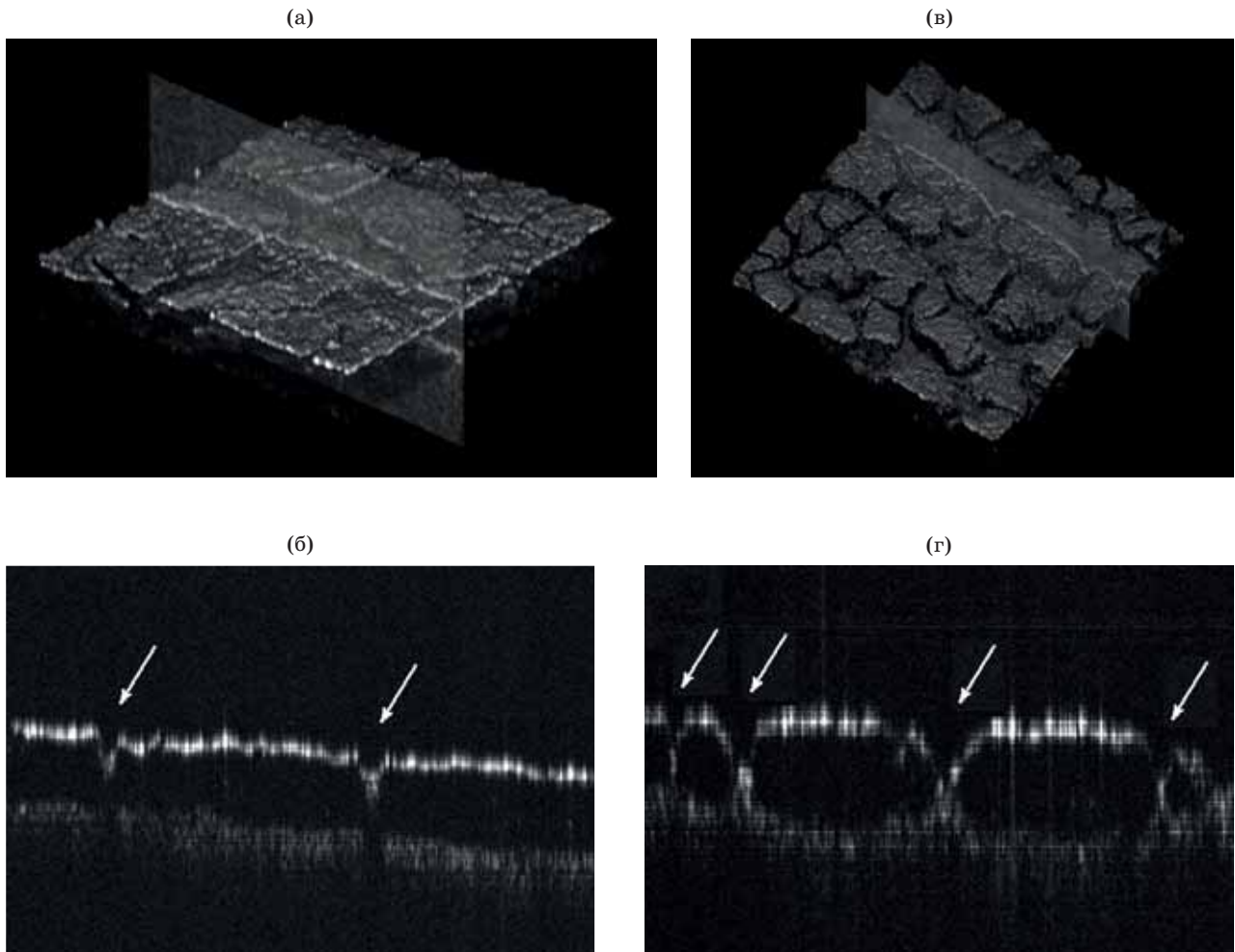


Рис. 4. Томограммы, полученные при исследовании структуры лаковой плёнки на авторской живописи (области 1 и 2 на рис. 3): трёхмерная томограмма в области 1 (а), В-скан в одном из сечений области 1, отмеченный плоскостью на трёхмерной томограмме (б), трёхмерная томограмма в области 2 (в), В-скан в одном из сечений области 2, отмеченный плоскостью на трёхмерной томограмме (г). Глубина сканирования составляет 280 мкм для области 1 и 170 мкм для области 2.

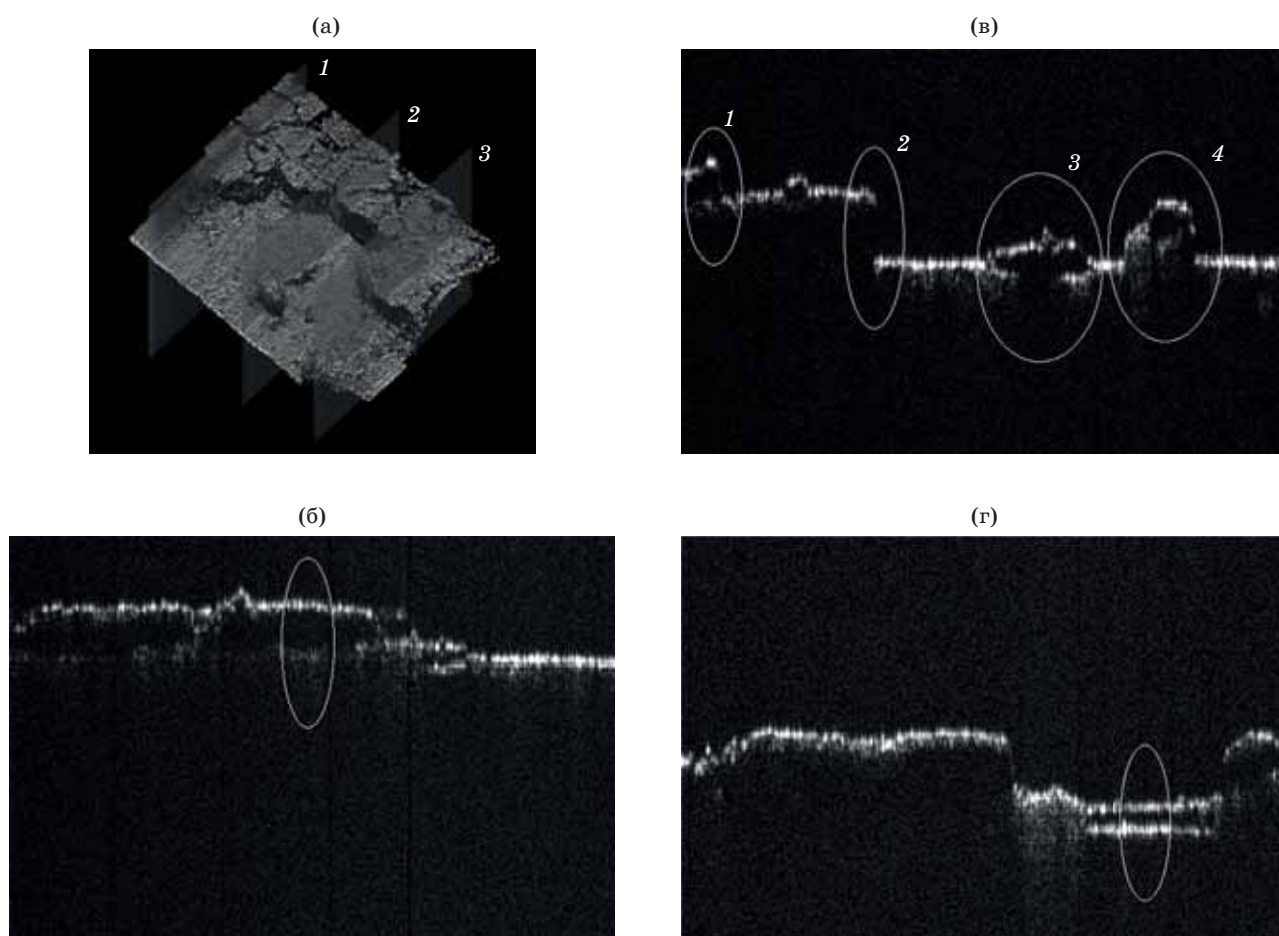


Рис. 5. Томограммы, полученные при исследовании области 3 на рис. 3: трёхмерная томограмма (а) и В-сканы (б–г), соответствующие сечениям 1, 2 и 3, отмеченным на трёхмерной томограмме. Глубина сканирования для всех томограмм составляет 400 мкм.

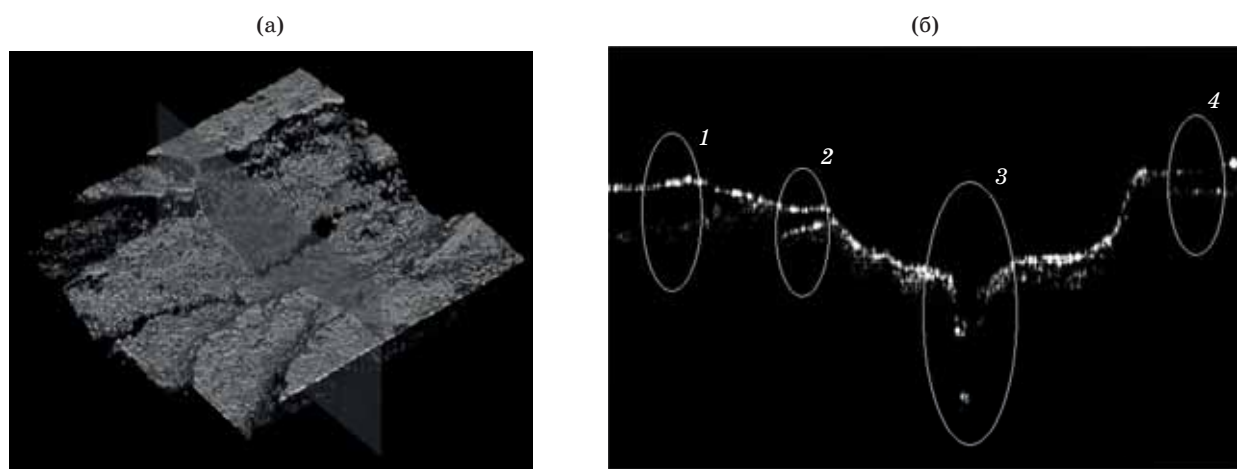


Рис. 6. Томограммы, полученные при исследовании области 4 на рис. 3: трёхмерная томограмма (а) и В-скан (б), соответствующий сечению, отмеченному плоскостью на трёхмерной томограмме. Глубина сканирования составляет 480 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы ОКТ обеспечивают возможность проведения неразрушающих исследований микроструктуры разнообразных материалов с различным масштабом неоднородностей и различными оптическими свойствами. Отличительная особенность методов ОКТ состоит в наиболее высокой разрешающей способности по сравнению с другими методами томографии, что позволяет разрабатывать новые перспективные методики исследований с использованием методов ОКТ, в частности, применительно к исследованиям предметов живописи.

Рассмотренная ОКТ-система полного поля обеспечивает восстановление трёхмерной микроструктуры объектов, выполненных в технике станковой темперной живописи с высокой разрешающей способностью и быстродействием.

Преимущество предлагаемого подхода к оцениванию параметров интерферометрических сигналов состоит в том, что не требуется априорное знание статистических или иных характеристик сигналов, поскольку при использовании алгоритма адаптивной фильтрации Винера необходимая информация извлекается из входного сигнала.

Представленные результаты демонстрируют возможности разработанной ОКТ-системы для диагностики состояния предметов станковой темперной живописи, представляющие реставраторам важную информацию о морфологии лаковых слоёв, характере загрязнений и повреждений на микроуровне. При этом преимуществом метода ОКТ является неразрушающий характер исследования, что является ключевым моментом при проведении реставрации уникальных памятников древнерусского искусства.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 19-79-10118) в части разработки метода исследования лабораторного образца ОКТ-системы и алгоритма обработки данных и Правительства Российской Федерации (заявка по проекту 2020-220-08-5053) по поддержке научных исследовательских проектов, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации, в части полученных экспериментальных результатов исследования ценных предметов станковой темперной живописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fercher F., Drexler W., Hitzenberger C.K., Lasser T. Optical coherence tomography — principles and applications // Rep. Prog. Phys. 2003. V. 66. № 2. P. 239–303.
2. Drexler W., Liu M., Kumar A., Kamali T., Unterhuber A., Leitgeb R.A. Optical coherence tomography today: speed, contrast, and multimodality // J. Biomed. Opt. 2014. V. 19. P. 071412-1–071412-34.
3. Schmitt J.M. Optical coherence tomography (OCT): a review // IEEE J. Select. Top. Quant. Electron. 1999. V. 5. P. 1205–1215.
4. Dubois A., Grieve K., Moneron G., Lecaque R., Vabre L., Boccara A.C. Ultrahigh-resolution full-field optical coherence tomography // Appl. Opt. 2004. V. 43. P. 2874–2883.
5. Gurov I. Signal processing methods in full-field optical coherence microscopy // Handbook of full-field optical coherence microscopy: technology and applications / Ed. by Dubois A. NY: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd, 2016. Chapt. 5. P. 183–222.
6. Liang H., Cid M., Cucu R., Dobre G.M., Podoleanu A.Gh., Pedro J., Saunders D. En-face optical coherence tomography — a novel application of non-invasive imaging to art conservation // Opt. Express. 2005. V. 13. № 16. P. 6133–6144.
7. Gurov I., Margaryants N., Zhukova E. Evaluation of art subjects implemented in the marquetry technique by the optical coherence microscopy method // Strain. 2019. V. 55. P. e12304.
8. Гуров И.П., Капранова В.О. Оценивание параметров интерференционных полос частичной когерентности методом адаптивной фильтрации Винера // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 11. С. 31–40.
9. Гуров И.П., Капранова В.О. Оценивание параметров интерференционных полос на основе модифицированного алгоритма адаптивной фильтрации Винера // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 2. С. 27–34.