

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-05-54-65

УДК 7.02 535-14

Оптические и терагерцовые методы исследования картин станковой масляной живописи

Иван Сергеевич Большаков¹✉, Анастасия Александровна Лыкина²,
Ольга Вячеславовна Кравченко³, Сергей Владимирович Сирро⁴,
Вячеслав Юрьевич Торопов⁵, Андрей Романович Цветков⁶,
PHILIP F. TADAY⁷, DONALD D. ARNONE⁸, Ольга Алексеевна Смолянская⁹

^{1, 2, 3, 4, 6, 9} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

^{4, 5} Государственный Русский музей, Санкт-Петербург, Россия

^{7, 8} TeraView Limited, 1 Enterprise, Кембриджский исследовательский парк, Кембридж, Великобритания

¹ is.bolshakov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0002-7288-7213>

² aalykina163@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1211-4254>

³ krav_olga@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4007-3402>

⁴ sirro2008@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1211-4254>

⁵ vtoropov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0002-4594-9423>

⁶ tsvetkovan56@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-5293-120X>

⁷ phil.taday@teraview.com

⁸ don@teraview.com

⁹ smolyanskaya@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8314-5314>

Аннотация

Предмет исследования. Методы терагерцовой томографии в исследовании картин станковой масляной живописи. **Цель работы.** Оценка эффективности терагерцовой томографии в анализе слоистой структуры художественных произведений, а также в выявлении скрытых повреждений, элементов и пометок. **Метод.** Используются традиционные методы анализа, такие как инфракрасная, ультрафиолетовая флуоресцентная и рентгеновская визуализации. Основное внимание уделено терагерцовой томографии, позволяющей получать изображения внутренней структуры объектов неинвазивным способом. **Основные результаты.** Продемонстрировано, что терагерцовая томография позволяет дифференцировать материалы, используемые для создания картин станковой масляной живописи, дает возможность подробно изучать слоистую структуру картин без повреждения исследуемого объекта, а также выявлять элементы, не обнаружимые другими методами исследования. Научная новизна работы заключается в предложенной методике применения терагерцовой томографии для предварительных обследований картин живописи *in situ* с целью обнаружения скрытых дефектов, а также возможных записей и других пометок на оборотной стороне произведения. **Практическая значимость.** Полученные результаты имеют практическую ценность при исследовании, оценке состояния сохранности и реставрации картин станковой масляной живописи, когда требуется выявление дефектов и скрытых элементов под слоями краски без повреждения красочного слоя. Особую эффективность метод терагерцовой томографии может иметь при применении методов *in situ*, когда необходимо избежать демонтажа картины.

Ключевые слова: терагерцовая томография, картины станковой масляной живописи, слоистая структура, реставрационные методы, методы анализа материалов для живописи, инфракрасная визуализация, ультрафиолетовая флуоресцентная визуализация, рентгеновская визуализация, скрытые дефекты, неинвазивные методы исследования, исследования *in situ*

Благодарность: исследования выполнены при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075–15–2021–593 от 01.06.2021 г.).

Ссылка для цитирования: Большаков И.С., Лыкина А.А., Кравценюк О.В., Сирро С.В., Торопов В.Ю., Цветков А.Р., Taday P.F., Arnone D.D., Смолянская О.А. Оптические и терагерцовые методы исследования картин станковой масляной живописи // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 5. С. 54–65. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-54-65>

Коды OCIS: 100.2960, 100.3010, 200.4560

Optical and terahertz methods for the study of oil painting artworks authors

IVAN S. BOLSHAKOV¹✉, ANASTASIYA A. LYKINA², OLGA V. KRAVTSENYUK³,
SERGEY V. SIRRO⁴, VYACHESLAV Y. TOROPOV⁵, ANDREY R. TSVETKOV⁶,
PHILIP F. TADAY⁷, DONALD D. ARNONE⁸, OLGA A. SMOLYANSKAYA⁹

^{1, 2, 3, 6, 9}ITMO University, St. Petersburg, Russia

^{4, 5}State Russian Museum, St. Petersburg, Russia

^{7, 8}TeraView Limited, 1 Enterprise, Cambridge Research Park, Cambridge, United Kingdom

¹is.bolshakov@mail.ru <https://orcid.org/0009-0002-7288-7213>

²aalykina163@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-1211-4254>

³krav_olga@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4007-3402>

⁴sirro2008@rambler.ru <https://orcid.org/0000-0002-1211-4254>

⁵vtoropov@mail.ru <https://orcid.org/0009-0002-4594-9423>

⁶tsvetkovan56@gmail.com <https://orcid.org/0009-0004-5293-120X>

⁷phil.taday@teraview.com

⁸don@teraview.com

⁹smolyanskaya@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-8314-5314>

Abstract

Subject of study. Terahertz tomography methods applied to the study of easel oil paintings. **Aim of study.** Evaluating the effectiveness of terahertz tomography for analyzing the layered structure of artworks and detecting hidden damages, elements, and annotations. **Method.** Traditional analysis methods such as infrared, ultraviolet fluorescence, and X-ray imaging were employed. Special emphasis was placed on terahertz tomography, enabling non-invasive imaging of internal structures. **Main results.** The study demonstrated that terahertz tomography allows differentiation of materials used in oil paintings. This method enables a detailed examination of the layered structure without damaging the object under investigation, revealing elements not detectable by other research methods. The scientific novelty lies in the proposed application of terahertz tomography for preliminary examinations of paintings *in situ* to detect hidden defects and possible inscriptions on the reverse side of the artwork. **Practical significance.** The obtained results are valuable for researching, assessing the preservation status, and restoring oil paintings, especially when detecting defects and hidden elements beneath paint layers without damaging the colorful surface. The terahertz tomography method proves particularly effective when applied *in situ*, avoiding the necessity of dismantling the painting.

Keywords: terahertz tomography, oil paintings, layered structure, restoration methods, painting material analysis methods, infrared visualization, ultraviolet fluorescence visualization, X-ray imaging, hidden defects, non-invasive research methods, *in situ* studies

Acknowledgment: the research was conducted with the support of a grant under the Decree of the Government of the Russian Federation № 220 dated April 9, 2010 (Agreement № 075-15-2021-593 dated June 01, 2021).

For citation: Bolshakov I.S., Lykina A.A., Kravtseyuk O.V., Sirro S.V., Toropov V.Y., Tsvetkov A.R., Taday P.F., Arnone D.D., Smolyanskaya O.A. Optical and terahertz methods for the study of oil painting artworks authors [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 5. P. 00–00. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-00-00>

OCIS codes: 100.2960, 100.3010, 200.4560

ВВЕДЕНИЕ

Живописные полотна обычно имеют сложную структуру и содержат нескольких слоев, которые в процессе бытования могут подвергаться деформации и повреждаться. Часто повреждения затрагивают внутренние слои произведения и не видны со стороны живописной поверхности невооруженным глазом. Многие живописные произведения, созданные в XVIII–XIX вв., имеют чрезвычайно сложную внутреннюю структуру, точное понимание которой — залог успешной реставрации.

Картины, выполненные в технике масляной живописи, имеют сложную и неоднородную структуру. В качестве основы может использоваться не только холст, но и дерево, и металл. Холст может быть наклеен на еще один холст, что усложняет исследовательский процесс. Грунт, положенный на холст и служащий основанием для живописи, может иметь несколько слоев разного цвета и состава. На верхний слой грунта часто наносится тонкий цветной слой — имприматура для создания общего колорита будущей картины. Далее следовали несколько красочных слоев, некоторые из которых могли быть полупрозрачными и предназначались для усиления цветового эффекта. После высыхания живопись покрывалась одним или двумя слоями покровного лака, но в процессе бытования на верхние слои лака оседала пыль, лак мутнел и для увеличения блеска и презентабельности картин их покрывали дополнительными слоями лака. Таким образом, на поверхности произведений станковой масляной живописи зачастую находится сложное покрытие, состоящее из слоев лака, нанесенных в разное время, и загрязнений [1]. Реставратор должен четко понимать, где находятся последние слои лака и до какой глубины он может совершать безопасное удаление лаковой пленки с загрязнениями [2]. Такая же ситуация складывается и в случае красочных слоев, которые могут относиться к разному времени и значительно исказить первоначальный авторский замы-

сел и колорит произведения. Реставратор должен однозначно понимать, каково состояние красочных слоев и грунта перед тем, как он приступит к реставрации.

Для принятия решения о необходимости проведения реставрационных работ нужны предварительные исследования, дающие оценку степени сохранности произведения, а также материалов и технологий его создания. Для анализа живописных произведений разработан целый спектр инвазивных и неинвазивных методов исследования, которые требуют правильного подбора перед началом реставрационного процесса.

Традиционные методы исследования не дают достаточно информации для понимания послойной структуры живописного произведения особенно в случае, когда затруднительно его перемещение и требуется проводить исследования *in situ*. В этом случае особенно ценна возможность получения информации о состоянии оборотной стороны произведения и наличия на ней пометок и записей. Такие данные могут быть получены методом терагерцовой (ТГц) томографии, исследованию возможностей которого применительно к реставрации картин станковой масляной живописи посвящена данная статья.

Современное развитие науки и техники дало возможность исследователям, занимающимся изучением и сохранением объектов культурного наследия, использовать электромагнитное излучение в диапазоне длин волн от терагерцового до рентгеновского [3]. Визуализация структуры произведений искусства необходима для понимания процесса создания объекта, состояния его сохранности, а также для обнаружения дефектов и выявления последующих вмешательств или дополнений. При изучении произведений искусства, и в частности живописи, наиболее часто используемым методом является мультиспектральная визуализация [4], позволяющая с помощью модифицированной полноспектральной цифровой камеры при использовании различных источников ос-

вещения и фильтров получать широкополосные спектральные изображения. Например, с помощью ультрафиолетового (УФ) фильтра можно определить вещества органического и неорганического происхождения, в том числе некоторые пигменты, лаки и другие компоненты, входящие в состав произведения живописи, по их свечению [5]. Используя инфракрасный (ИК) фильтр, можно рассмотреть многочисленные детали, скрытые под слоем помутневшего и потрескавшегося, непрозрачного в видимом диапазоне спектра слоя лака, сквозь некоторые краски можно увидеть скрытые под ними изображения [6]. Рентгеновская визуализация благодаря проникающим способностям рентгеновского излучения позволяет идентифицировать материалы, используемые при создании живописного произведения, технику нанесения красок, а также состояние сохранности [3]. Методы мультиспектральной визуализации, дополняя друг друга, позволяют реставраторам, кураторам и ученым без инвазивного вмешательства получать частичную информацию о структуре и состоянии сохранности картины, а также технике и материалах, использованных художником.

Однако, используя их, невозможно определить последовательность слоев произведений живописи, выделить интересующий слой и узнать о его составляющих. Изучение послойной структуры объектов культурного наследия, именуемое стратиграфией, обеспечивает основу для искусствоведческих исследований, оценки их подлинности и атрибуции, понимание исторических или специфических для художников методов создания, а также для оценки состояния сохранности и вытекающих из этого требований к хранению и реставрации.

Традиционный подход к получению информации о стратиграфии произведений искусства и объектов культурного наследия основан на изучении поперечных сечений, отобранных с объектов микропроб с помощью стандартных микроаналитических инструментов, таких как оптическая и электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская визуализация, рамановская и инфракрасная спектроскопия [7]. Такой подход является инвазивным: в результате отбора микропроб нарушается целостность картины.

Перспективным методом, способным изучать стратиграфию объекта, является ТГц томография, основным преимуществом которой является полностью неразрушающее воздействие. Данная технология уже хорошо зарекомендовала себя в медицинских исследованиях для анализа биологических образцов и их послойной детализации [8–17]. Эти примеры показывают, что с помощью ТГц томографии можно получать как информацию о структуре исследуемого объекта, так и данные о его химическом составе. С 2006 г. ТГц волны стали активно использоваться в области интроскопии живописных полотен, что обусловлено рядом интересных свойств электромагнитных волн данного диапазона [18, 19]. Терагерцовые методы исследования позволяют заглянуть сквозь многослойную структуру живописных полотен, что дает возможность получать информацию о состоянии отдельных слоев [20, 21]. При этом ТГц излучение является неионизирующим и в системах ТГц спектроскопии и томографии используется его низкая интенсивность, что позволяет получать данные о структуре предмета искусства неинвазивным методом. Для исследования живописных картин, выполненных на холсте, данный метод может быть использован как в режиме на пропускание, так и в режиме отражения от слоев объекта [22]. Посредством многоакурных измерений и последующей процедуры реконструкции (восстановления) внутренней структуры объекта могут быть обнаружены, например, скрытые трещины и дефекты с оценкой их расположения по глубине. В настоящее время имеется технологическая возможность использовать широкий диапазон ТГц частот, что может существенно обогатить дополнительной информацией существующие методы диагностики состояния сохранности музейного объекта перед его реставрацией [23, 24].

При изучении живописного полотна желательно избегать его транспортировки, поскольку помимо логистических усилий и финансовых затрат это подвергает картину ненужному стрессу вследствие погрузочно-разгрузочных работ и изменения климатических условий. По этой причине использование для исследований методов *in situ* является предпочтительным.

Целью настоящей работы является оценка эффективности ТГц томографии для анализа

слоистой структуры художественных произведений, а также для выявления скрытых повреждений, элементов и пометок. Для этого в мастерских Русского музея был изготовлен тест-объект, имитирующий типичные аспекты исследования и дефекты состояния сохранности картин станковой масляной живописи, свойства которого подробно описаны в статье [25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тест-объект

Тест-объект представляет собой композицию слоев известного состава, собранную в соответствии со структурой реального живописного произведения. В качестве основы для его создания был взят фрагмент картины XIX в., которая является копией неизвестного художника с картины И.К. Айвазовского и хранится в частном собрании. На эту основу поверх красочного слоя были нанесены накраски прямоугольной формы коричневого и зеленого цветов. Эта сторона тест-объекта стала оборотной, а на лицевую сторону был нанесен грунт коричневого цвета и изображение головы человека. Важно отметить, что объект не был покрыт слоем лака.

Оптические и рентгеновские методы исследования структуры объекта

Помимо ТГц томографии для изучения структурных особенностей тест-объекта использовались традиционные методы мультиспектральной визуализации. Это получение изображений в ИК и в рентгеновском спектральных диапазонах, а также съемка с использованием УФ флуоресцентного светофильтра.

Изображения тест-объекта с лицевой стороны в ИК диапазоне были сделаны с помощью модифицированной камеры (*Nikon D70*, компания *Nikon Ltd.*) и ИК фильтра *IKS-1* (900 нм), установленного на основной объектив камеры. Для изучения поверхностных дефектов красочного слоя и грунтовки тест-объекта использовалась УФ флуоресцентная съемка. В качестве источников УФ излучения служили два светильника (*CLE Design Ltd.*), каждый с четырьмя лампами (*blacklight-blue F36w / blb-ts, Sylvania*). Источники находились на расстоянии 1 м от тест-объекта под углом 45°. Видимая

люминесценция регистрировалась камерой *Nikon D3* с УФ фильтром (*Hoyahtcsuperuv, Hoya*), который поглощает отраженное УФ излучение.

Дополнительно было получено интегральное изображение структуры тест-объекта в рентгеновском диапазоне. Рентгеновская трубка (*Introvolt 100 VE, Promavtomatika*) размещалась перед тест-объектом и направлялась на его лицевую сторону. Технические характеристики рентгеновской трубки — напряжение 35 кВ и ток 4 мА. Рентгеновская пленка (*Agfa 100 NIF, Agfa*) находилась за тест-объектом и располагалась на его оборотной стороне.

Терагерцовая томография

Для изучения внутренней структуры тест-объекта использовался импульсный ТГц томограф (*TeraPulseLx*, компания *TeraViewLtd Ltd.*). Терагерцовый томограф работает в спектральном диапазоне частот от 0,06 до 3,00 ТГц в режиме отражения. Максимальная амплитуда его спектральной мощности находится примерно на 0,5 ТГц, частота импульсов составляет 80 МГц, а оптическая длительность импульса — 2,5 пкс. Сканирование выполняется со скоростью до 16 с на 1 см², а пространственное разрешение можно регулировать в пределах от 0,25 до 0,50 мм в зависимости от выбранного размера шага. Сканирующее излучение направляется перпендикулярно плоскости передней поверхности тест-объекта, регистрируется излучение, отраженное от его многослойной внутренней структуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование тест-объекта инфракрасным, ультрафиолетовым и рентгеновским методами

Изображения передней стороны тест-объекта, полученные с использованием ИК и УФ флуоресцентного фильтров, приведены на рис. 1а, б соответственно.

Контуры графического наброска четко видны на изображении (рис. 1а), сделанном в ИК диапазоне спектра, что обусловлено низким поглощением излучения ближнего ИК диапазона белым слоем и малой толщиной красочного слоя вдоль контурных линий. Следует отметить, что на этом изображении мазки краски

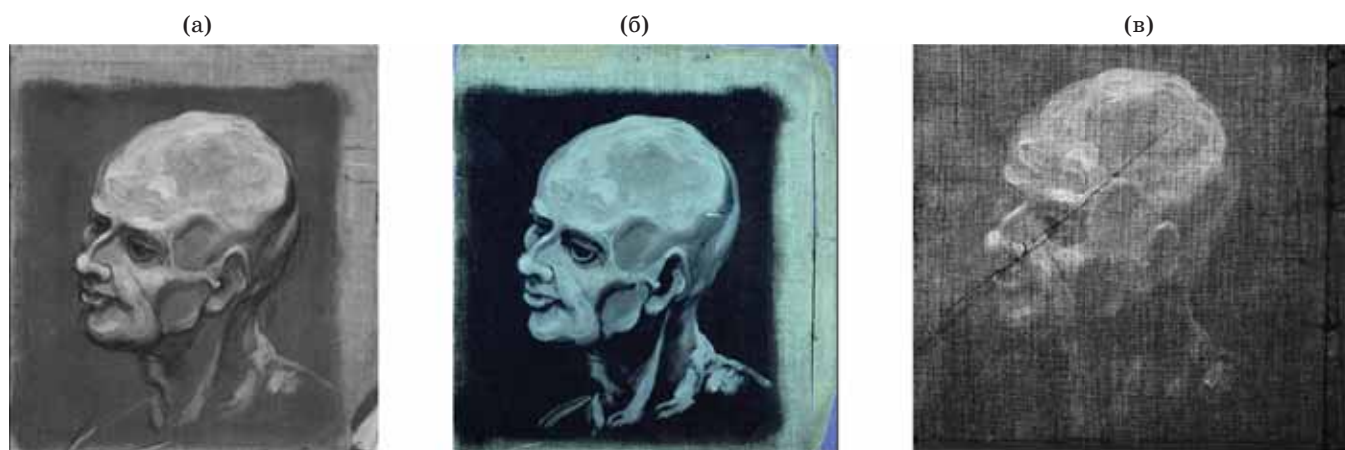


Рис. 1. Исследование тест-объекта традиционными методами. Изображения передней стороны тест-объекта, сделанное камерой *Nikon D70* за инфракрасным фильтром IKS-1 (900 нм) (а), полученные с использованием УФ флуоресцентного фильтра (б) и в рентгеновском диапазоне спектра (в)

Fig. 1. Study of a test object using traditional methods. Images of the front side of the test object (а) taken with a *Nikon D70* camera behind an IKS-1 (900 nm) infrared filter, obtained (б) using an ultraviolet fluorescent filter and (в) in the X-ray range of the spectrum

видны также и в нижнем правом углу, который в процессе изготовления тест-объекта был покрыт коричнево-красным грунтом.

Рисунок 1б соответствует изображению передней стороны тест-объекта, полученному при использовании УФ флуоресцентного фильтра. На изображении наблюдается структура холста картины XIX в. и выраженные мазки краски. Голова человека написана плотными мазками свинцово-цинковых белил, что особенно хорошо видно при сравнении изображений, сделанных в результате съемки за ИК и УФ флуоресцентными фильтрами. Белила на основе цинка обладают выраженными люминесцентными свойствами и выглядят холодно-белыми на изображении, полученном при использовании УФ флуоресцентного фильтра (рис. 1б).

Сравнивая рис. 1а и рис. 1б, полученные с помощью ИК и УФ систем, можно получить информацию только о структуре и дефектах верхних слоев объекта исследования.

На изображении, полученном в рентгеновском диапазоне (рис. 1в), можно увидеть трещину в холсте, находящуюся на оборотной стороне тест-объекта, а также контур изображения картины. Можно предположить, что трещина в холсте соответствует повреждению грунта или красочного слоя картины XIX в. Однако глубину трещин в тест-объекте невоз-

можно оценить или рассчитать, так как полученное таким образом изображение является интегральным. Наличие и расположение прямоугольных наклеек на оборотной стороне картины также не было выявлено. На это повлияла плотная грунтовка на основе свинцово-цинковых белил и слой живописи на оборотной стороне тест-объекта, который также был выполнен с использованием свинцово-цинковых белил.

Исследование внутренней структуры тест-объекта методом терагерцовой томографии

На втором этапе изучения внутренней структуры тест-объекта было проведено ТГц сканирование передней стороны объекта в режиме отражения и получены изображения, сформированные при отражении ТГц излучения от его слоистой структуры: ТГц С-сканы тест-объекта (двумерное представление данных, вид изображения сверху) и ТГц В-сканы тест-объекта (двумерное представление данных, поперечный срез изображения). Для послойного изучения тест-объекта анализировались ТГц В-сканы, предоставляющие информацию о глубине слоистой структуры образца вдоль отраженного ТГц сигнала в плоскости X (Позиция, мм), Y (Оптическая задержка, мм). Пример ТГц В-скана тест-объекта представ-

лен на рис. 2. Горизонтальные линии на ТГц В-скане указывают на отражение ТГц излучения между слоями тест-объекта.

На ТГц В-скане тест-объекта зеленым и голубым цветами нанесены два отраженных ТГц сигнала. Голубым цветом выделен ТГц сигнал, соответствующий положению (20, -70), и зеленым цветом — ТГц сигнал, соответствующий положению (80, -70), на ТГц С-скане. Заметим, что выделенные ТГц сигналы имеют схожие черты, связанные с отражениями от соответствующего слоя, хотя есть небольшие отличия из-за локальных различий на тест-объекте. Схожая особенность ТГц сигналов связана с отражением от красочного слоя лицевой стороны тест-объекта (белый слой «1» на рис. 2), где обозначенному зеленым цветом

ТГц сигналу соответствует временная задержка 3,26–3,70 мм, а голубым — 3,60–3,82 мм. Слой холста, покрытый коричневым грунтом (холст «3» и коричневый слой «4» на рис. 2), можно четко определить по соответствующим временным задержкам у «зеленого» ТГц сигнала от 3,70 до 3,80 мм и «голубого» — от 3,82 до 4,12 мм. Выраженные различия ТГц сигналов, составляющие 3,80–4,28 мм у «зеленого» ТГц сигнала и 3,95–4,50 мм у голубого, связаны со сложной структурой красочного слоя на оборотной стороне тест-объекта. Отметим, что «зеленый» ТГц сигнал имеет отклик от неоднородности внутри слоистой структуры тест-объекта (положение 68–94 мм внутри светлой горизонтальной линии). Можно предположить, что была найдена особенность в слоистой

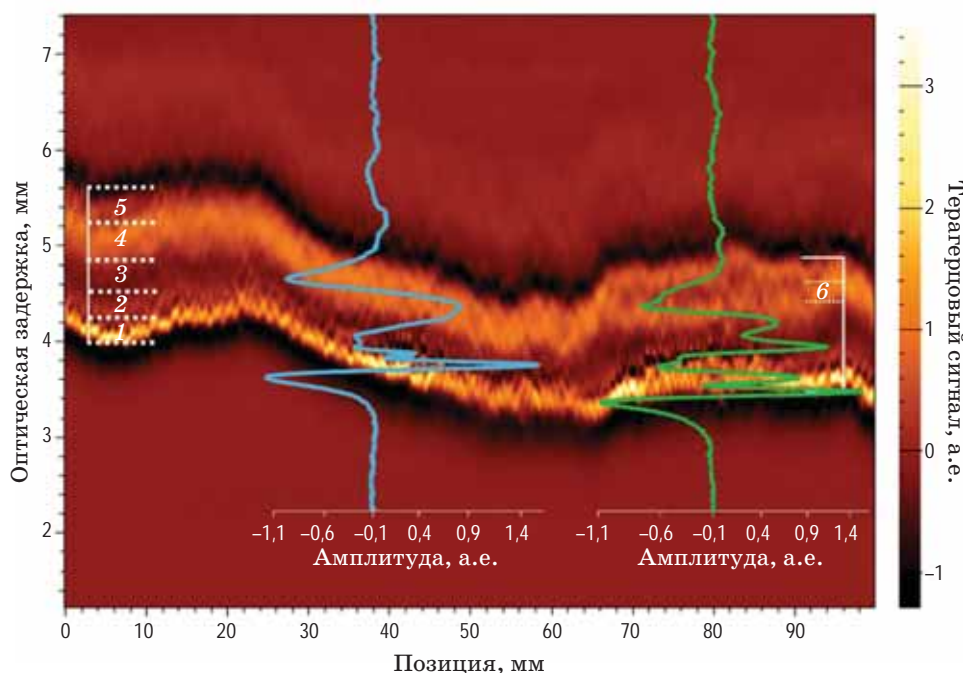


Рис. 2. В-скан (двумерное представление данных, поперечный срез изображения) на основе амплитуды исходного ТГц сигнала. На графике — зависимость оптической задержки от положения. На скане построены два отраженных ТГц сигнала, соответствующих двум положениям на С-скане (двумерное представление данных, вид изображения сверху), в голубом (соответствует положению (20, -70)) и зеленом (соответствует положению (80, -70)) цветах. Обозначения (1–6) соответствуют следующим слоям тестового объекта: 1 — белый слой (передняя сторона), 2 — красно-коричневый грунт, 3 — холст, 4 — белая грунтовка, 5 — синий/черный слой (обратная сторона), 6 — особенность тест-объекта

Fig. 2. B-scan (two-dimensional data representation, cross-section of the image) based on the amplitude of the original THz signal. The graph shows the dependence of the optical delay on position. Two reflected THz signals are plotted on the scan, corresponding to two positions on the C-scan (two-dimensional representation of the data, top view of the image), in blue (corresponding to position (20, -70)) and green (corresponding to position (80, -70)) colors. Designations (1–6) correspond to the following layers of the test object: (1) is white layer (front side), (2) is red-brown primer, (3) is canvas, (4) is white primer, (5) is blue/black layer (back side), (6) is test object feature

структуре, которая может соответствовать подписи реставратора, покрытой сверху на краской коричневого цвета. Перемещаясь по ТГц сигналам вглубь В-скана тест-объекта, можно получить разделение друг от друга слоев красок и холста.

На следующем этапе было проведено изучение каждого слоя тест-объекта. Пошагово перемещаясь согласно оптической задержке ТГц сигналов вглубь слоев тест-объекта, выявлены структурные особенности слоев, представленные в виде ТГц С-сканов. Наличие структурных особенностей в слоях влияет на усиление или ослабление рассеяния ТГц излучения, поэтому для более эффективного их выявления необходимо переходить в высокочастотную

область, так как более высокочастотные компоненты в пределах интегрированной спектральной полосы пропускания соответствуют более коротким длинам волн, выявляя мелкие и тонкие особенности [26]. Для изучения частотной составляющей ТГц сигналов было проведено преобразование Фурье для каждого ТГц сигнала. При построении ТГц С-сканов тест-объекта каждый пиксел получал определенный цвет в зависимости от интенсивности ТГц сигнала.

На рис. 3–6 представлены ТГц С-сканы определенных областей тест-объекта в спектральном диапазоне от 0,1 до 2,5 ТГц, в которых были выявлены структурные особенности. Красными прямоугольниками на лицевой

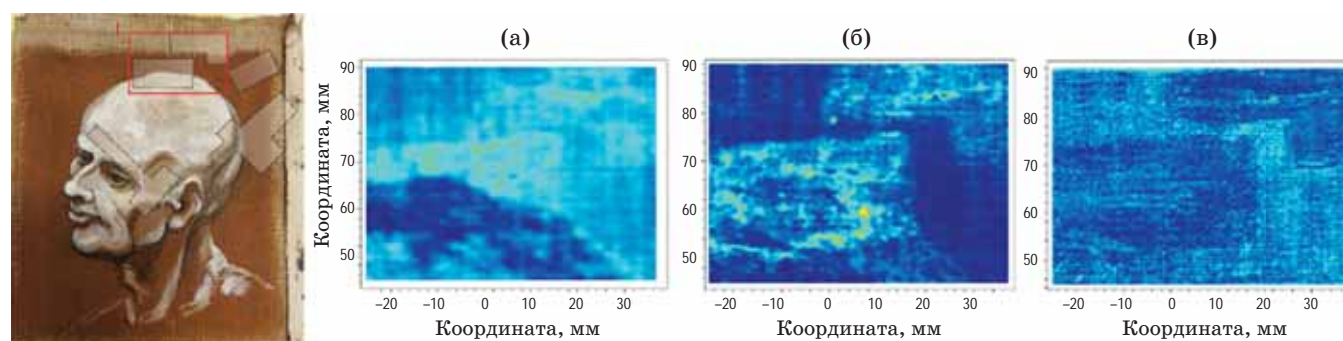


Рис. 3. Изображения ТГц С-сканов тест-объекта со структурными особенностями, соответствующие области «I», на частотах 0,2 (а), 0,35 (б), 0,75 (в) ТГц. Красный прямоугольник и цифра «I» соответствуют выбранной области тест-объекта, в которой выделены особенности структуры в слоях

Fig. 3. Images of THz C-scans of a test object with structural features corresponding to region “I” at frequencies of (a) 0.2, (б) 0.35, (в) 0.75 THz. The red rectangle and number “I” correspond to the selected area of the test object, in which structural features in the layers are highlighted

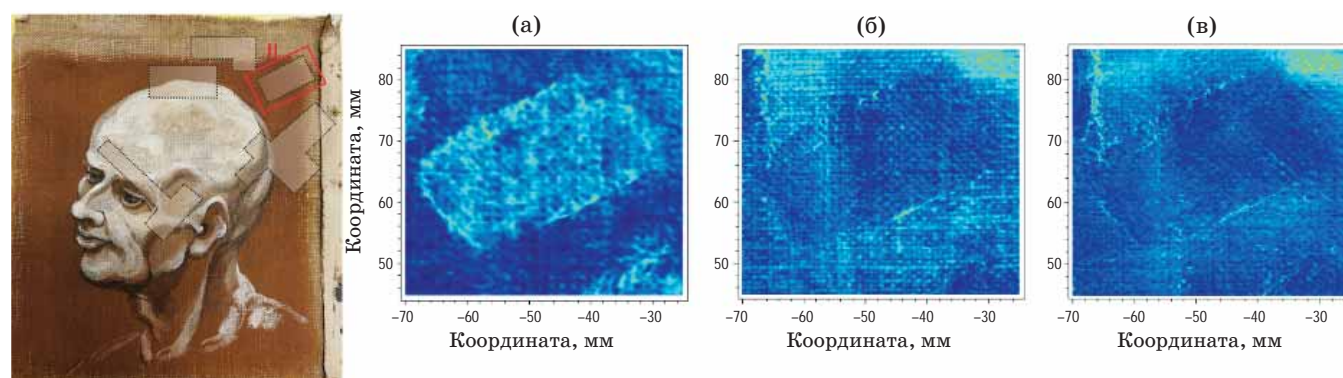


Рис. 4. Изображения ТГц С-сканов тест-объекта со структурными особенностями, соответствующие области «II», на частотах 0,4 (а), 0,8 (б), 1,5 (в) ТГц. Красный прямоугольник и цифра «II» соответствуют выбранной области тест-объекта, в которой выделены особенности структуры в слоях

Fig. 4. Images of THz C-scans of a test object with structural features corresponding to region “II”, at frequencies of (a) 0.4, (б) 0.8, (в) 1.5 THz. The red rectangle and number “II” correspond to the selected area of the test object, in which structural features in the layers are highlighted

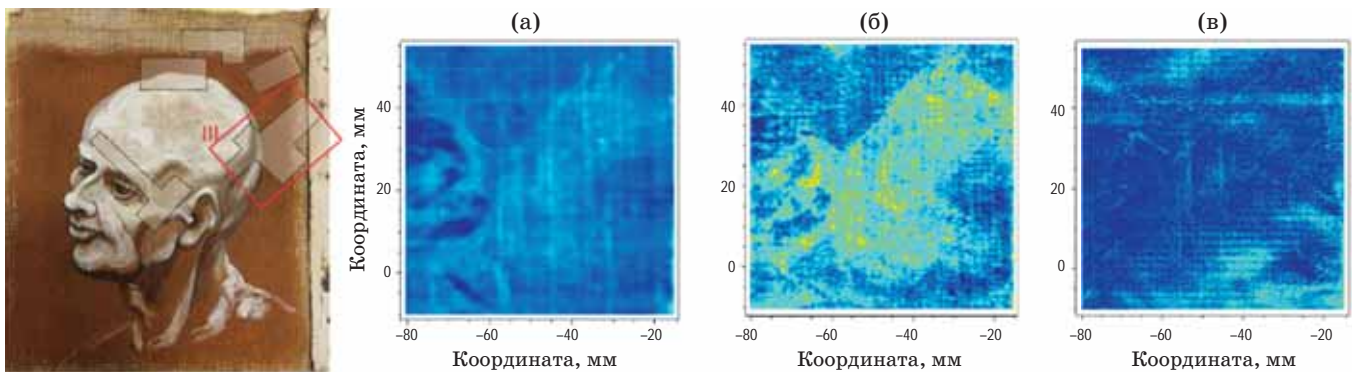


Рис. 5. Изображения ТГц С-сканов тест-объекта со структурными особенностями, соответствующие области «III», на частотах 0,2 (а), 0,35 (б), 2,5 (в) ТГц. Красный прямоугольник и цифра «III» соответствуют выбранной области тест-объекта, в которой выделены особенности структуры в слоях

Fig. 5. Images of THz C-scans of a test object with structural features corresponding to region “III”, at frequencies of (a) 0.2, (б) 0.35, (в) 2.5 THz. The red rectangle and number “III” correspond to the selected area of the test object, in which structural features in the layers are highlighted

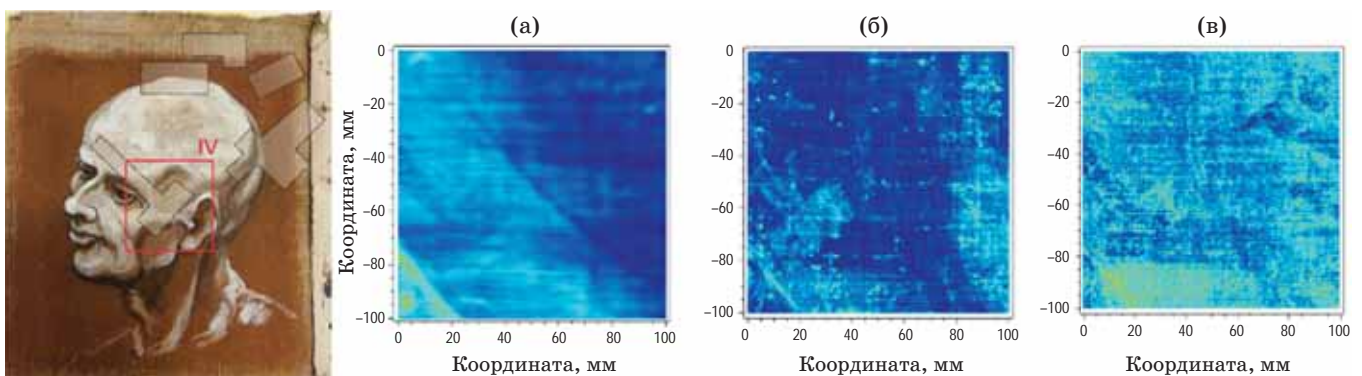


Рис. 6. Изображения ТГц С-сканов тест-объекта со структурными особенностями, соответствующие области «IV», на частотах 0,1 (а), 0,4 (б), 0,7 (в) ТГц. Красный прямоугольник и цифра «IV» соответствуют выбранной области тест-объекта, в которой выделены особенности структуры в слоях

Fig. 6. Images of THz C-scans of a test object with structural features corresponding to region “IV” at frequencies of (a) 0.1, (б) 0.4, (в) 0.7 THz. The red rectangle and number “IV” correspond to the selected area of the test object, in which structural features in the layers are highlighted

стороне картины выделены области сканирования, где были выявлены структурные особенности в слоях тест-объекта. Для каждой области было выбрано три ТГц С-скана на определенной частоте с выявленной особенностью.

На частоте 0,2 ТГц в области «I» хорошо виден фрагмент изображения головы человека, располагающийся в верхних слоях лицевой стороны тест-объекта (рис. 3а). Следует отметить, что наблюдаемые различия в интенсивности поглощения ТГц излучения белой краской говорят о количестве этого материала, используемого при создании изображе-

ния. Об этом можно судить по цвету пикселей на ТГц С-скане. При погружении вглубь слоев тест-объекта в области «I» на частоте 0,35 ТГц видно две накраски на оборотной стороне тест-объекта (рис. 3б). Уже на частоте 0,75 ТГц (рис. 3в) видно четкое изображение холста картины XIX в., на котором был найден излом под накраской в правом верхнем углу ТГц С-скана.

На ТГц С-сканах области «II» можно заметить накраску в виде прямоугольника, изображение которой имеет яркие цвета на частоте 0,4 ТГц (рис. 4а). На более высоких ча-

стотах наблюдаются выраженные изменения структуры холста тест-объекта — это очертания потертостей и небольшой излом, который находится в верхнем левом углу на ТГц С-сканах области «II» (рис. 4б, в).

Рассматривая ТГц С-сканы области «III» до 0,2 ТГц (рис. 5а), можно увидеть границу между слоями белой краски и грунтовки холста, где слева на изображении видны очертания мазков свинцово-цинковых белил. Отметим, что на частоте 0,2 ТГц проявляется очертание накраски с оборотной стороны тест-объекта. Приближаясь к более высоким частотам, заметны изменения структуры холста — выраженные потертости и изломы (рис. 5в).

Терагерцовые С-сканы области «IV» имеют схожие признаки структурных особенностей слоев тест-объекта во всем спектральном диапазоне, как и в области «I». Например, на частоте 0,1 ТГц наблюдается изображение верхних слоев тест-объекта (рис. 6а), на частоте 0,4 ТГц в ТГц С-скане (рис. 6б) области «IV» можно рассмотреть накраску, находящуюся на оборотной стороне тест-объекта, и структурные изменения холста.

ОБСУЖДЕНИЕ

При визуализации тест-объекта картины станковой масляной живописи методом УФ флуоресцентной фотографии с его лицевой стороны видно прорисовку головы человека свинцово-цинковыми белилами, а также структуру холста. На изображении, полученном при съемке с ИК фильтром, проявились графические наброски и мазки красок, которые при изготовлении тест-объекта были закрасены красно-коричневой грунтовкой. При сопоставлении этих изображений видно, что белила на основе цинка проявляют ярко выраженные люминесцентные свойства и имеют холодный белый цвет. На этих интегральных изображениях можно идентифицировать некоторые пигменты красок и увидеть дефекты верхних слоев исследуемого объекта.

Рентгеновская визуализация позволила получить интегральное изображение всего объекта без дифференциации по глубине. На рентгенограмме видны размытое изображение головы человека, структура холста и очертания его потертостей, небольшие трещины, а также крупный излом полотна, располагающийся

на оборотной стороне тест-объекта. Однако плотность красочных слоев и грунта такова, что следов изображения и прямоугольных накрасок с оборотной стороны тест-объекта не фиксируется.

Таким образом, традиционными неинвазивными методами визуализации оказалось невозможным определить последовательность слоев картины станковой масляной живописи, исследовать выбранный слой, а также обнаружить накраски на оборотной стороне.

Прямоугольниками на лицевой стороне тест-объекта выделены четыре области сканирования, где методом ТГц томографии в спектральном диапазоне от 0,2 до 2,5 ТГц на ТГц С-сканах были выявлены структурные особенности в слоях. В верхних слоях лицевой стороны тест-объекта в изображении головы человека наблюдаются различия в интенсивности поглощения ТГц излучения белой краской, что позволяет судить о количестве этой краски, используемой при нанесении рисунка головы. В области нижних слоев тест-объекта видны накраски, нанесенные на оригинальное изображение XIX в., служащее оборотной стороной тест-объекта. По ТГц сканам можно изучить структурные изменения холста: видны выраженные очертания потертостей и изломы, заметен даже излом под накраской. Хорошо заметна граница между слоями белой краски грунтовки и холста, а слева на изображении заметны очертания мазков свинцово-цинковых белил. На изображении, полученном на частоте 0,5 ТГц, хорошо различимы прямоугольные очертания накрасок с оборотной стороны тест-объекта, сделанные красками разных цвета и состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа продемонстрировала, что ТГц томография позволяет дифференцировать материалы, используемые для создания картин станковой масляной живописи. Этот метод дает возможность подробно изучать слоистую структуру картин без повреждения исследуемого объекта, а также выявлять элементы, не обнаружимые другими методами исследования. Особенности картины живописи, расположенные на оборотной стороне, в ходе проведенного исследования выявлялись сканированием ТГц излучением через переднюю поверхность картины.

Полученные таким образом ТГц изображения соответствуют изображению, видимому на оборотной стороне объекта. Были сделаны двумерные изображения разных слоев картины масляной живописи и выявлены особенности этих слоев. В данной работе удалось получить ТГц изображения на красках на оборотной стороне сложного двухстороннего тест-объекта. Таким образом, метод ТГц визуализации может быть полезен при планировании исследовательских и реставрационных работ,

выявлении дефектов в структуре живописных слоев, а также при поиске скрытых объектов под слоями краски.

Использование ТГц томографии в музейной практике для исследования картин станковой масляной живописи дополнит традиционную методику мультиспектральных и рентгенологических исследований информацией о внутренней структуре, а также позволит проводить предреставрационные или технологические обследования *in situ*.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вейко В.П., Сирро С.В. Исследование взаимодействия лазерного излучения с покровными лаками, используемыми в масляной живописи // Сб. тр. XI междунар. конф. Фундаментальные проблемы оптики — 2019. Санкт-Петербург, Россия. 21–25 октября 2019. С. 165–167.
Veyko V.P., Sirro S.V. Investigation of the interaction of laser radiation with coating varnishes used in oil painting [in Russian] // XI Internat. Conf. Fundamental problems of optics — 2019 (Collection of reports). Saint-Petersburg, Russia. October 21–25, 2019. P.165–167.
2. Сирро С.В. Исследование произведений искусства и объектов культурно-исторического наследия. Новые технологии и их применение // В мире неразрушающего контроля. 2018. Т. 21. № 3. С. 56–59.
Sirro S.V. Research of works of art and objects of cultural and historical heritage. New technologies and their application [in Russian] // In the World of Non-destructive Testing. 2018. V. 21. № 3. P. 56–59.
3. Borg B., Dunn M., Amg A., et al. The application of state-of-the-art technologies to support artwork conservation: Literature review // J. Cultural Heritage. 2020. V. 44. P. 239–259. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.02.010>
4. Cosentino A., Stout S. Photoshop and multispectral imaging for art documentation // e-Preservation Sci. 2014. V. 11. P. 91–98.
5. Rorimer J.J. Ultra-violet rays and their use in the examination of works of art. Metropolitan Museum of Art, 1931. 173 p.
6. Moon T., Schilling M.R., Thirkettle S. A note on the use of false-color infrared photography in conservation // Studies in Conservation. 1992. P. 42–52. <https://doi.org/10.2307/1506436>
7. Bitossi G., Giorgy R., Mauro M., et al. Spectroscopic techniques in cultural heritage conservation: A survey // Appl. Spectrosc. Rev. 2005. V. 40. № 3. P. 187–228. <https://doi.org/10.1081/ASR-200054370>
8. Smolyanskaya O.A., Chernomyrdin N.V., Konovko A.A., et al. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids // Progress in Quantum Electronics. 2018. V. 62. P. 1–77. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2018.10.001>
9. Smolyanskaya O.A., Dolganova I., Zaytsev K., et al. Tissue optical clearing in the terahertz range // Handbook of Tissue Optical Clearing: New Prospects in Optical Imaging. 2022. P. 445–458. <https://doi.org/10.1201/9781003025252-28>
10. Baranova A., Lykina A.A., Smolyanskaya O.A., et al. Optical properties of crystalline lactose fluidized with dilutions of various substances in the terahertz frequency range // Pharmaceutics. 2021. V. 14. № 1. P. 32. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14010032>
11. Lykina A.A., Nazarov M.M., Konnikova M.R., et al. Terahertz spectroscopy of diabetic and non-diabetic human blood plasma pellets // J. Biomed. Opt. 2021. V. 26. № 4. P. 043006–043006. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.26.4.043006>
12. Kulya M.S., Odlyanitsky E.L., Cassar Q., et al. Fast terahertz spectroscopic holographic assessment of optical properties of diabetic blood plasma // J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2020. V. 41. P. 1041–1056. <https://doi.org/10.1007/s10762-021-00782-x>
13. Smolyanskaya O.A., Lazareva E.N., Nalegaev S.S., et al. Multimodal optical diagnostics of glycosylated biological tissues // Biochemistry (Moscow). 2019. V. 84. P. 124–143. <https://doi.org/10.1134/S0006297919140086>
14. Smolyanskaya O.A., Schelkanova E.L., Тейпкина А.Н., et al. Glycerol dehydration of native and diabetic animal tissues studied by THz-TDS and NMR methods // Biomed. Opt. Exp. 2018. V. 9. № 3. P. 1198–1215. <https://doi.org/10.1364/BOE.9.001198>
15. Афонин М.В., Балбекин Н.С., Гареев Г.З. и др. Особенности терагерцовых спектров наночастиц оксида железа в оболочке из диоксида кремния и наночастиц оксида и гидроксида железа // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 8. С. 16–22.
Afonin V., Balbekin N.S., Gareev G.Z., et al. Features of the terahertz spectra of iron oxide nanoparticles in a silicon dioxide shell and of iron oxide and hydroxide nanoparticles // J. Opt. Technol. 2017. V. 84. № 8. P. 515–520. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000515>
16. Дука Ц.М., Кудрявцев И.В., Серебрякова М.К. и др. Исследование действия широкополосного терагерцового излучения на функциональную активность клеток // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 11. С. 16–23.
Duka C.M., Kudryavtsev I.V., Serebryakova M.K., et al. Investigation of the effect of broadband terahertz radiation on the functional activity of cells // J. Opt. Technol. 2013. V. 80. № 11. P. 655–660. <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000655>
17. Грачев Ю.В., Куклин И.А., Смолянская О.А. и др. Исследование воздействия излучения диапазона частот 0,05–2 ТГц на биологические ткани различной толщины в медицинской диагностике // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 11. С. 92–94.

- Grachev Y.V., Kuklin I.A., Smolyanskaya O.A., et al. Study of how radiation of the frequency range 0.05–2 THz affects biological tissues of various thickness in medical diagnosis // *J. Opt. Technol.* 2010. V. 77. № 11. P. 731–733. <https://doi.org/10.1364/JOT.77.000731>
18. Fukunaga K. THz technology applied to cultural heritage in practice. Springer, 2016. 144 p.
19. Chopard A., Tsiplakova E., Balbekin N., et al. Single-scan multiplane phase retrieval with a radiation of terahertz quantum cascade laser // *Appl. Phys. B.* 2022. V. 128. № 3. P. 63. <https://doi.org/10.1007/s00340-022-07787-x>
20. Dandolo C.L.K., Lopez M., Ueno Y., et al. Toward a multimodal fusion of layered cultural object images: Complementarity of optical coherence tomography and terahertz time-domain imaging in the heritage field // *Appl. Opt.* 2019. V. 58. № 5. P. 1281–1290. <https://doi.org/10.1364/AO.58.001281>
21. Guillet J.-P., Roux M., Wang K., et al. Art painting diagnostic before restoration with terahertz and millimeter waves // *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.* 2017. V. 38. P. 369–379. <https://doi.org/10.1007/s10762-017-0358-1>
22. Dong J., Locquet A., Melis M., et al. Global mapping of stratigraphy of an old-master painting using sparsity-based terahertz reflectometry // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. № 1. P. 15098. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15069-2>
23. Ma X., Guillet J.-P., Wang K., et al. Terahertz frequency modulated continuous wave imaging for non-destructive evaluation of painting and multilayer parts // *Proc. SPIE.* 2018. P. 246–251. <https://doi.org/10.1117/12.2291016>
24. Cassar Q., Guillet J.-P., Koch-Dandolo C.L., et al. Characterization of varnish ageing and its consequences on terahertz imagery: Demonstration on a painting presumed of the French renaissance // *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.* 2020. V. 41. P. 1556–1566. <https://doi.org/10.1007/s10762-020-00733-y>
25. Andreev I.I., Sirro S.V., Lykina A.A., et al. Necessity and use of a multilayer test object based on an anonymous 19th century copy of a painting by Ivan Konstantinovich Aivazovsky (1817–1900) // *Heritage.* 2022. V. 5. № 4. P. 2955–2965. <https://doi.org/10.3390/heritage5040153>
26. Gomez-Sepulveda A.M., Hernandez-Serrano A.I., Radpour R., et al. History of Mexican easel paintings from an altarpiece revealed by non-invasive terahertz time-domain imaging // *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.* 2017. V. 38. P. 403–412. <https://doi.org/10.1007/s10762-016-0346-x>

АВТОРЫ

Иван Сергеевич Большаков — лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 190034, Россия; <https://orcid.org/0009-0002-7288-7213>; is.bolshakov@mail.ru

Анастасия Александровна Лыкина — Scopus ID: 5722211366; <https://orcid.org/0000-0002-1004-1506>; Aalykina163@gmail.com

Ольга Вячеславовна Кравценюк — кандидат физико-математических наук, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; Scopus ID: 57191415448, <https://orcid.org/0000-0002-4007-3402>; krav_olga@mail.ru

Сергей Владимирович Сирро — заведующий отделом, Государственный Русский музей, Санкт-Петербург, 191086, Россия; Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-1211-4254>; s.sirro@rusmuseum.ru

Вячеслав Юрьевич Торопов — ведущий инженер, Государственный Русский музей, Санкт-Петербург, 191086, Россия; <https://orcid.org/0009-0002-4594-9423>; toropov@mail.ru

Андрей Романович Цветков — студент, лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0009-0004-5293-120X>; tsvetkovan56@gmail.com

Филип Ф. Тадай — кандидат наук, старший консультант, TeraView, Кембридж, CB25 9PD, Великобритания; phil.taday@teraview.com

Дональд Д. Арнон — кандидат наук, генеральный директор, TeraView, Кембридж, CB25 9PD, Великобритания; don@teraview.com

Ольга Алексеевна Смолянская — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая лабораторией, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 199034, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-8314-5314>; smolyanskaya@itmo.ru

AUTHORS

Ivan S. Bolshakov — Laboratory Assistant, ITMO University, St. Petersburg, 190034, Russia; <https://orcid.org/0009-0002-7288-7213>; is.bolshakov@mail.ru

Anastasia A. Lykina — Scopus ID: 5722211366; <https://orcid.org/0000-0002-1004-1506>; Aalykina163@gmail.com

Olga V. Kravtsenyuk — PhD (Physics and Mathematics), Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 199034, Russia; Scopus ID: 57191415448, <https://orcid.org/0000-0002-4007-3402>; krav_olga@mail.ru

Sergey V. Sirro — Head of Department, State Russian Museum, St. Petersburg, 191086, Russia; ITMO University, St. Petersburg, 199034, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-1211-4254>; s.sirro@rusmuseum.ru

Vyacheslav Y. Toropov — Lead Engineer, State Russian Museum, St. Petersburg, 191086, Russia; <https://orcid.org/0009-0002-4594-9423>; toropov@mail.ru

Andrey R. Tsvetkov — Student, Laboratory Assistant, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-5293-120X>; tsvetkovan56@gmail.com

Philip F. Taday — PhD, Senior Consultant, TeraView, Cambridge, CB25 9PD, United Kingdom; phil.taday@teraview.com

Donald D. Arnone — PhD, CEO, Founder, TeraView, Cambridge, CB25 9PD, United Kingdom; don@teraview.com

Olga A. Smolyanskaya — PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of Laboratory, Senior Researcher, ITMO University, St. Petersburg, 199034, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8314-5314>; smolyanskaya@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 10.11.2023

Одобрена после рецензирования 09.02.2024

Принята к печати 27.03.2024

The article was submitted to the editorial office 10.11.2023

Approved after review 09.02.2024

Accepted for publication 27.03.2024