

УДК 621.383

PACS: 85.60.-g

Рефлектография произведений искусства в диапазоне 0,9–1,7 мкм с использованием SWIR-камеры инфракрасного диапазона спектра

В. С. Попов, Д. С. Першин, П. А. Храбров, Е. А. Морозова, В. П. Пономаренко

Проведено исследование иконы «Чудо Георгия о змие» (первая треть XVIII века) и картины «Натюрморт с кетой» (М. Соколов, 1930-е гг.) методом инфракрасной рефлектографии с использованием отечественной камеры ИК-диапазона спектра 0,9–1,7 мкм. Выявлены скрытые элементы изображения, не наблюдаемые в видимом диапазоне спектра.

Ключевые слова: ИК рефлектография, ИК-имеджинг, SWIR, NIR, живопись, скрытые элементы живописи.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-23-33

Введение

Исследование предметов искусства с применением естественнонаучных методов позволяет пролить свет на историю их создания, выявить особенности техники и технологии, установить подлинность или помочь реставраторам при восстановлении поврежденных элементов.

Среди методов исследования неразрушающие методы являются наиболее предпочти-

тельными, так как позволяют получить информацию о структуре и составе объектов культурного наследия, не повреждая их. К таким методам относят оптико-физические, связанные с воздействием на исследуемый объект электромагнитного излучения различных диапазонов спектра.

Рентгеновское излучение обладает наиболее высокой проникающей способностью, которая, однако, оказывается избыточной, вследствие чего метод не может дать ответ о послойном строении живописи, особенно если мастер использовал пигменты органического происхождения или состоящие из легких элементов. Инфракрасное излучение, в особенности ближневолнового и коротковолнового ИК-диапазонов, способно проникать сквозь отдельные красочные слои и позволяет обнаружить авторский рисунок, изменения композиции, поздние вмешательства, а также скрытые надписи и подписи [1, 2].

Инфракрасное излучение для исследования произведений живописи стало применяться довольно рано с использованием фотопленки чувствительной в ближневолновом ИК-диапазоне 0,75–0,9 мкм. Однако, данный подход имел ограниченную информативность, связанную с процессами рассеяния и поглощения в красочных слоях в данном спектральном диапазоне. Существенного улучшения метода можно было достигнуть путем расширения длинноволновой границы чувствительности,

Попов Виктор Сергеевич^{1,2}, нач. спец. констр.-техн. центра, в.н.с., доцент, к.х.н.

E-mail: popov.vs@mipt.ru

Першин Дмитрий Сергеевич^{3,4}, вед. спец., художник-реставратор, с.н.с.

Храбров Павел Владимирович¹, руководитель проектов.

Морозова Екатерина Александровна³, н.с.

Пonomаренко Владимир Павлович^{1,2}, гл.

конструктор, зав. кафедрой, д.ф.-м.н., профессор.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

³ Государственный научно-исследовательский институт реставрации.

Россия, 107014, Москва, ул. Гастелло, 44, стр 1.

⁴ Государственная Третьяковская галерея.

Россия, 119017, Москва, Лаврушинский пер. 10, стр. 4.

Статья поступила в редакцию 01 февраля 2022 г.

© Попов В. С., Першин Д. С., Храбров П. В., Морозова Е. А., Пономаренко В. П., 2022

что ограничивалось свойствами доступных ИК-чувствительных фотопленок [3]. Стремление повысить эффективность метода привело к тому, что в середине 1960-х годов van Asperen de Boer [2, 3] разработал метод инфракрасной рефлектографии (англ. Infrared Reflectography), основанный на регистрации отраженного ИК-излучения с использованием полупроводникового фотоприемника на основе сульфида свинца (максимум чувствительности 2,0 мкм), снабженного сканирующей системой, обеспечивающей развертку 350 линий.

В настоящее время методы ИК-рефлектографии (или ИК-имеджининга) с использованием различных диапазонов применяются для исследования всевозможных объектов культурного наследия, включая иконы, картины, петроглифы, наскальную живопись [4–6] и становятся одними из обязательных методов при комплексном исследовании произведений искусства, поскольку помогают установить историю их создания, проверить подлинность и выявить состояние сохранности. Например, в 2019 году Лондонская Национальная галерея с применением данного метода обнаружила ранее неизвестные эскизы руки Леонардо да Винчи под красочными слоями на полотне «Мадонна на скалах» [7].

Информативность данного метода исследования складывается из целого ряда факторов, поскольку произведение живописи представляет собой сложную систему, состоящую из основы (холста, пергамента, дерева и пр.), грунта (обычно состоящего из мела, гипса или свинцовых белил), подготовительного рисунка, красочных слоев и защитного слоя (олифы или лака) [1]. Помимо этого, живописный слой может быть перекрыт более поздними наслоениями записей, реставрационными тонировками или поверхностными загрязнениями.

Принципиальная структура красок, применяющихся в живописи и росписях с древнейших времен и по настоящее время, в целом не претерпела существенных изменений и представляет собой пигмент, распределенный в слое связующего вещества [1, 8]. В зависимости от цвета и оттенка, красочные слои включают в себя смеси пигментов, инертные наполнители, технологические добавки и др. Степень проникновения ИК-излучения в красочный слой в определенном диапазоне спектра, складывается из:

- поглощающей, пропускающей и отражающей способности всех компонентов краски, что обусловлено их химической природой;
- рассеивающей способности пигментов, обусловленной размером частиц (дисперсностью);
- толщины красочного слоя.

Несмотря на то, что грунт, как правило, скрыт под красочными слоями, именно его характеристики определяют, насколько контрастно будут выявляться скрытые элементы на изображении отраженного ИК-излучения. Чем выше отражающая способность грунта в заданном спектральном диапазоне, тем интенсивнее поток отраженного излучения проходящего через красочные слои и формирующего изображение на матрице фотоприемника.

Опубликован ряд работ, демонстрирующих использование методов ИК-имеджининга в спектральных диапазонах 0,75–1,1 мкм [9–12], 0,8–2,5 мкм [10, 12–15] и 3–5 мкм [9], в том числе в мультиспектральном режиме наложения изображений нескольких указанных диапазонов [10, 16]. Особенности взаимодействия красочных слоев и грунтов с ИК-излучением различных диапазонов приводят к существенным отличиям в характере получаемой информации. В [17] предложен метод идентификации пигментов по мультиспектральным изображениям, основанный на различиях в поглощающей, пропускающей и отражающей способностях компонентов красочных слоев.

Аппаратура, чувствительная к ИК-излучению в различных диапазонах длин волн, существенно отличается по сложности конструкции, используемым оптическим материалам и типам фотоприемников, что в итоге приводит к существенным отличиям в стоимости.

Наиболее доступным из указанных является исследование в ближнем ИК-диапазоне, которое возможно реализовать с использованием относительно недорогих потребительских фотокамер на основе кремниевых матриц. Благодаря спектральному диапазону чувствительности кремния, простирающемуся вплоть до 1,2 мкм [18], становится возможным получить при небольшой модификации даже на любительской фототехнике изображения изучаемого объекта в ближнем ИК-диапазоне (0,78–1,2 мкм). Для этого с коммерческой матрицы удаляют фильтр, отсекающий ИК-

часть спектра и затем дополняют фильтрами отсекающими видимую и УФ-части спектра.

Использованные в настоящей работе матрицы на основе InGaAs, позволяющие вести исследования в диапазоне 0,9–1,7 мкм, как правило, выполнены по гибридной технологии, предполагающей попиксельное соединение с кремниевой большой интегральной схемой (БИС) считывания с матрицей фоточувствительных элементов, изготовленной по эпитаксиальной технологии [19]. Необходимость гибридизации двух различных полупроводниковых структур в гибридных матрицах приводит к существенному возрастанию стоимости камер данного диапазона (в среднем в 20–30 раз) по сравнению с обычными камерами на основе кремниевого сенсора.

Матричные фотоприёмники на основе HgCdTe и InSb для SWIR (short wave infrared или коротковолновый инфракрасный диапазон, 0,9–1,7 мкм) и MWIR (middle wavelength infrared или средневолновый инфракрасный диапазон, 3–5 мкм) диапазонов, соответственно, требуют систем охлаждения до криогенных температур. Матрицы из данных материалов, также как и в случае InGaAs, выполнены по гибридной технологии [19]. Указанные особенности конструкции и технологии изготовления приводят к тому, что приборы стоят не менее чем в 100 раз дороже камер на основе кремниевых матриц. А учитывая более дорогие оптические материалы для объективов среднего ИК-диапазона, стоимость таких приборов в комплекте с объективом возрастает ещё в несколько раз.

Таблица 1

Характеристики наиболее распространенных типов приемников ИК-излучения

№ п/п	Материал	Спектральный диапазон, мкм	Доступный формат	Необходимость охлаждения
1	Si	0,4–1,1	12032×9024	Охлаждение не требуется
2	InGaAs	0,9–1,7	320×256 640×512	Охлаждение не требуется
3	HgCdTe	0,8–2,5	640×512	Криогенное охлаждение
4	InSb	3–5	640×512	Криогенное охлаждение

Исходя из этого, вопрос нахождения оптимума с точки зрения информативности спектрального диапазона и затрат на покупку и обслуживание исследовательской аппаратуры на заданный спектральный диапазон имеет решающее значение для широкого применения в исследовании объектов искусства в различных научно-реставрационных центрах, музеях и частными экспертами.

Сравнение возможностей рефлектографии различных спектральных диапазонов ИК-излучения, проведенное на модельных образцах красок различной толщины и грунтов, показало высокую прозрачность большинства пигментов и высокую информативность в коротком ИК-диапазоне [20]. Вместе с тем, реальные произведения живописи в зависимости от техники исполнения и индивидуальных приёмов автора могут иметь существенно более сложную структуру по сравнению с модельными образцами. В частности художник или иконописец мог наносить на один и тот же участок произведения последовательно различные краски и лаковые слои, в том числе закрашивать

ранее созданные изображения, что значительно снижает контрастность внутренних слоёв и в конечном итоге ухудшает информативность исследования. Особенную востребованность такие методики будут иметь при реставрационных работах объектов культурного наследия, там где живопись может быть закрыта более поздними слоями различных материалов, в особенности там где невозможно перемещение объекта живописи в лабораторию, например при поиске под слоями краски и реставрации фресок в восстанавливаемых храмах.

Настоящая работа посвящена изучению возможностей SWIR-камеры отечественной разработки чувствительной в диапазоне 0,9–1,7 мкм в сравнении с камерой на основе модифицированной потребительской камеры ближневолнового ИК-диапазона при исследовании двух произведений живописи, существенно отличающихся по технике исполнения и художественным материалам: иконы первой трети XVIII века и картины XX века.

Ранее, в ходе пробного эксперимента с данной SWIR-камерой была продемонстриро-

вана информативность получаемых изображений при исследовании объекта современной живописи [21]. Но поскольку состав современных красок может существенно отличаться от красок, применявшихся несколько десятков и сотен лет назад, необходимо исследовать эффективность и установить особенности работы SWIR-камеры отечественной разработки и производства при изучении предметов живописи более раннего времени, созданных в различных техниках.

Экспериментальная часть

В работе проведено исследование методом инфракрасной рефлектографии иконы (рис. 1, а) «Чудо Георгия о змие» (первая

треть XVIII века, темпера, сусальное серебро, 92,8×71,5 см) и картины (рис. 1, б) «Натюрморт с кетой» (М. Соколов, 1930-е гг., грунтованный картон, масло, 68,5×89 см).

ИК-рефлектография выполнялась с помощью отечественной SWIR-камеры разработки АО «НПО «Орион» (Россия) с фотоприемной матрицей на основе InGaAs, предназначенной для регистрации ИК-изображения в диапазоне 0,9–1,7 мкм. Основные характеристики камеры приведены в табл. 2, а спектральная зависимость чувствительности и внешний вид камеры показаны на рис. 2. Максимум чувствительности матрицы достигается на длине волны 1,55 мкм.



а



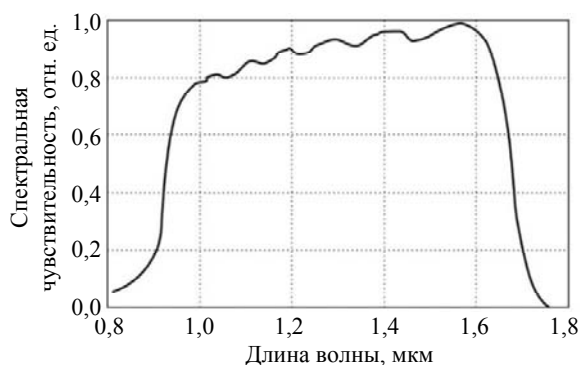
б

Рис. 1. а – Икона «Чудо Георгия о змие» (точками показана схема отбора проб); б – картина «Натюрморт с кетой»

Таблица 2

Характеристики SWIR-камеры коротковолнового ИК-диапазона (АО «НПО «Орион»)

Параметр	Значение
Формат матрицы фоточувствительных элементов	320×256
Шаг фоточувствительных элементов, мкм	30
Спектральный диапазон, мкм	0,9–1,7
Частота кадров, Гц	2–200
Среднее значение обнаружительной способности в максимуме спектральной чувствительности при времени накопления не более 33 мс, не менее, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	5×10 ¹²
Фокусное расстояние объектива, мм	50
Динамический диапазон, не менее, дБ	65
Потребляемая мощность, не более, Вт	5
Габариты, без объектива, мм	62×56×49,8



а



б



в

Рис. 2. а – спектральная зависимость чувствительности SWIR-камеры; б – внешний вид SWIR-камеры; в – взаимное расположение SWIR-камеры и картины в процессе съемки

Исследование объектов проводилось при естественном дневном освещении. Камера устанавливалась на штатив напротив картины на расстоянии 40–50 см, как показано на рис. 2, в.

Для сравнения информативности исследования проводилась съемка в ближнем ИК-диапазоне с помощью модифицированной для ИК-фотографии камеры Nikon D700 (КМОП сенсор Sony IMX-071), снабженной отрезающим ИК-фильтром, имеющим пропускание около 5 % при длине волны 1,13 мкм и достигающим пропускания 64 % при 1,2 мкм.

Для наглядности те же участки исследуемых произведений живописи фотографировались с помощью стандартной фотокамеры видимого диапазона Nikon D800E на основе кремниевой КМОП матрицы.

Предварительный анализ химического состава красок и наполнителя грунта в исследованных предметах искусства был проведен с использованием ряда аналитических методов:

- поляризационная микроскопия в проходящем свете (микроскоп ПОЛАМ Л-213М, ЛОМО);

- энергодисперсионный рентгеновский микроанализ (настольный сканирующий электронный микроскоп Hitachi TM4000 Plus с приставкой для энергодисперсионного микроанализа Quantax 75 (Bruker));

- микрохимический качественный анализ;
- исследование поперечных шлифов красочного слоя в поляризованном отраженном свете (микроскоп ПОЛАМ Р-312, ЛОМО); фотоаппарат Canon EOS 2000D).

Это позволило в дальнейшем сопоставить полученные результаты инфракрасной рефлектографии со спектральными характеристиками художественных материалов, которые были идентифицированы на различных участках произведений живописи.

Экспериментальные результаты и обсуждение

По итогам сравнения результатов рефлектографии иконы в диапазонах 0,4–0,7 мкм (стандартная КМОП-камера), 1,13–1,2 мкм (ИК модифицированная КМОП-камера, NIR) и 0,9–1,7 мкм (SWIR-камера) (рис. 3) можно

заключить, что на полученных в ближневолновом и коротковолновом ИК-диапазонах изображениях красочные слои прозрачны и позволяют увидеть нанесенный иконописцем рисунок. Кроме того, на изображениях SWIR-диапазона более отчётливо наблюдаются скрытые специальные буквенные обозначения

сделанные иконописцем на начальной стадии работы над иконой, обозначающие цвета красок, которые должны быть нанесены в соответствующих местах (рис. 3, в, е) и надписи, скрытые поздними красочными слоями и не наблюдаемые в видимом диапазоне спектра (рис. 3, и).

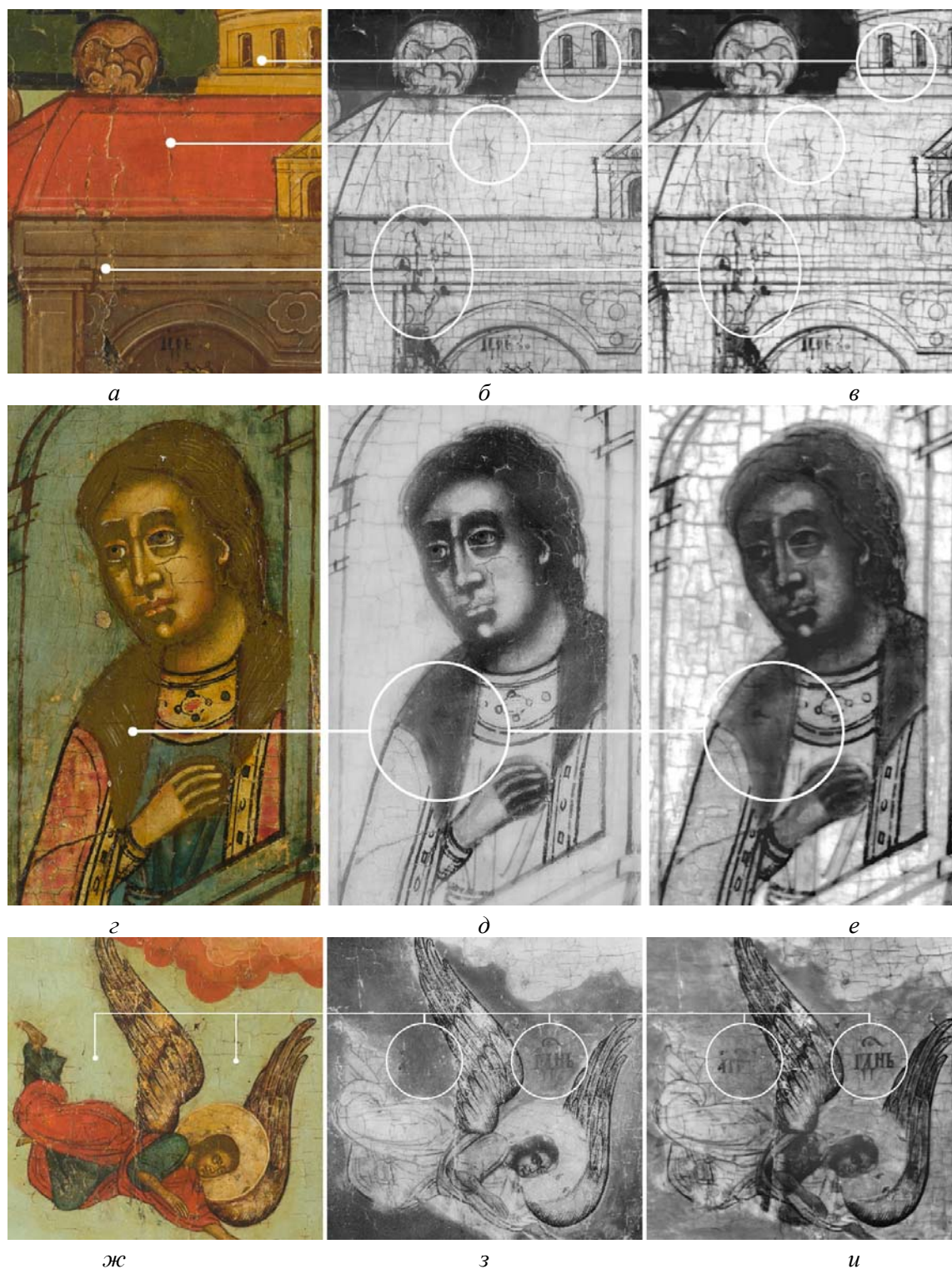


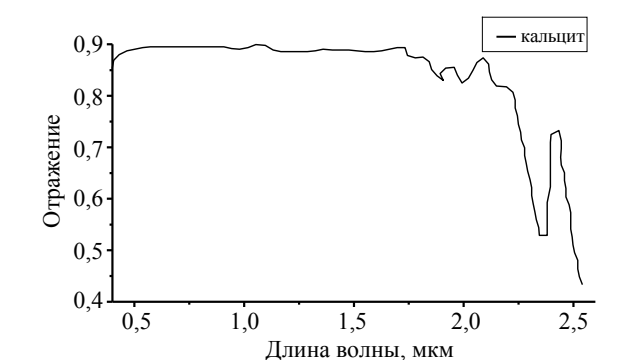
Рис. 3. Изображения различных участков иконы, полученные в различных спектральных диапазонах: а, г, ж – $0,4 \div 0,7$ мкм (видимый); б, д, з – $1,132 \div 1,2$ мкм (ближний ИК); в, е, и – $0,9 \div 1,7$ мкм (короткий ИК)

Согласно данным поляризационной микроскопии в состав наполнителя грунта иконы входят мел и кальцит. Карбонат кальция имеет высокую отражающую способность во всем рабочем диапазоне SWIR-камеры (0,9–1,7 мкм), максимум отражательной способности приходится на диапазон 0,85–0,90 мкм [22] (рис. 4, а), поэтому в данном случае создаются условия, позволяющие наблюдать рисунок, надписи и специальные символы сквозь красочные слои (табл. 3).

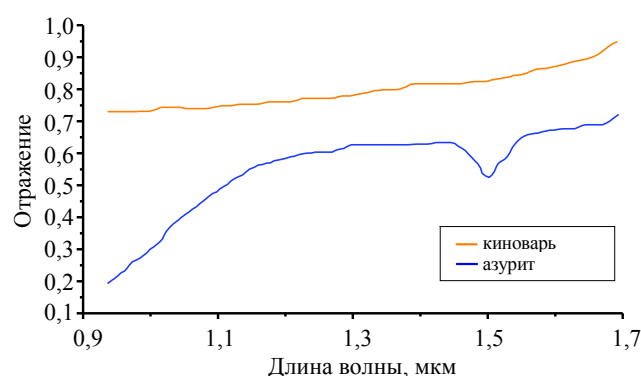
Использованные в красочных слоях иконы пигменты (табл. 3), такие как свинцовые белила, киноварь, свинцовый сурик, также об-

ладают существенным отражением (более 70 %) в диапазоне 0,9–1,7 мкм (рис. 4, б, в), однако по-видимому из-за малой толщины красочных слоев достигается их прозрачность в указанном диапазоне.

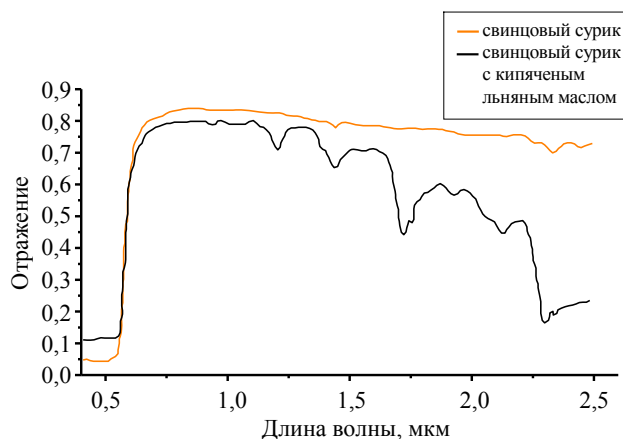
Контрастность полученных изображений в SWIR-диапазоне позволяет сделать вывод, что сочетание грунта с высокой отражающей способностью и тонких красочных слоев даже при высокой отражающей способности пигментов в исследуемом диапазоне спектра позволяет получать изображения рисунка с высокой информативностью.



а



б



в

Рис. 4. Спектры отражения некоторых художественных материалов в SWIR-диапазоне: а – кальцит [22]; б – азурит и киноварь [23]; в – свинцовый сурик [24]

Таблица 3

Состав проб красочных слоёв, отобранных в различных участках иконы «Чудо Георгия о змие» (рис. 1, а)

№ пробы	Состав
1	Искусственный азурит, свинцовые белила
2	Желтая охра, свинцовые белила, глауконит, немного черной угольной
3	Киноварь, свинцовый сурик
4	Красный органический пигмент, свинцовые белила, немного черной угольной
5	Зеленый медь-содержащий пигмент (хлорид меди), немного искусственного азурита, свинцовые белила, коричневый железосодержащий пигмент, черная угольная
6	Искусственный азурит, свинцовые белила
7	Коричневый железосодержащий пигмент

При исследовании картины «Натюрморт с кетой» с использованием модифицированной кремниевой камеры ближнего ИК и SWIR-камеры были обнаружены элементы композиции (букет цветов в вазе), позднее закрашенные автором и не наблюдаемые в видимом диапазоне в окончательном варианте картины (рис. 5). Более полно они наблюдаются на изображениях SWIR-диапазона (рис. 5, в).



а



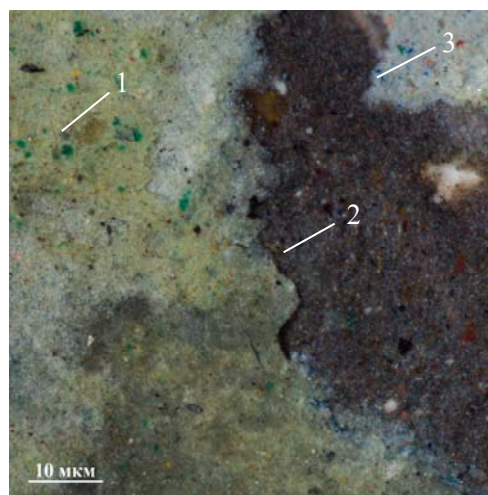
б



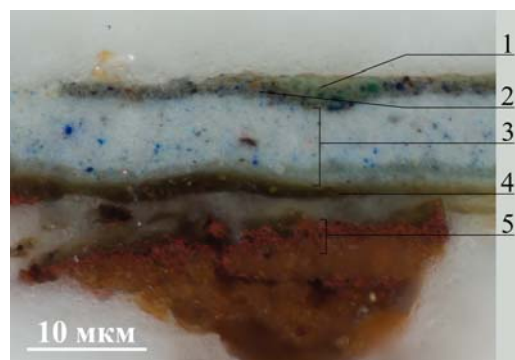
в

Рис. 5. Изображения картины «Натюрморт с кетой», полученные в различных спектральных диапазонах: а – $0,4\pm 0,7$ мкм (видимый); б – $1,132\pm 1,2$ мкм (ближний ИК); в – $0,9\pm 1,7$ мкм (короткий ИК). Белой окружностью выделен участок фона, где была отобрана микропроба для исследования структуры красочного слоя

Исследование структуры красочного слоя фона на заднем плане картины (участок фона, где была отобрана проба, выделен на рис. 5 белой окружностью) выявило следующую последовательность нанесения красочных слоев (рис. 6): 1 – слой зеленоватой прописи, 2 – темно-серый красочный слой (пятна на поверхности авторского красочного слоя), 3 – слой живописи (авторская переработка), 4 – покровный слой (лак), 5 – слой нижележащей живописи (первоначальная композиция).



а



б

Рис. 6. Микрофотографии (а) поверхности красочного слоя и (б) поперечного сечения красочного слоя в отраженном поляризованном свете (участок фона на заднем плане картины «Натюрморт с кетой», отмечен белой окружностью на рис. 5): 1 – слой зеленоватой прописи; 2 – слой темно-серого пятна на поверхности авторского красочного слоя; 3 – слой живописи (авторская переработка); 4 – покровный слой (лак); 5 – слой живописи (первоначальный вариант фона). В процессе изготовления микрошлиф расслоился, из-за чего между слоями 4 и 5 попала матрица (магнезиальный цемент)

В табл. 4 приведен состав красочных слоев 1–3, относящихся к наблюдаемому в видимом свете изображению. Состав красочных

слоев нижележащего изображения, наблюдаемого в ИК-диапазоне, детально не исследовался, однако в слое 5 был идентифицирован железосодержащий пигмент (красная охра).

Таблица 4

Состав красочных слоёв на участке картины «Натюрморт с кетой», отмеченном на рис. 5. Обозначение красочных слоев соответствует приведенному на рис. 6

№ красочного слоя	Состав
1	изумрудная зеленая, сажа, красный марс, цинковые белила
2	цинковые белила, изумрудная зеленая, берлинская лазурь, стронциановая желтая, сажа
3	цинковые белила, синий кобальт, искусственный ультрамарин, немного киновари, сажа

Для формирования изображения цветов, скрытых слоями краски, излучение от источника должно пройти сквозь слои 1–4 и отразиться от слоя 5 (рис. 6, б). Железосодержащий пигмент (охра), входящий в состав красочного слоя нижележащей живописи (слой 5 на рис. 6, б), имеет большую отражающую способность в длинноволновой части (более 1,1 мкм), что объясняет более отчетливо наблюдаемое изображение цветов на изображениях с модифицированной камеры ближнего ИК- и SWIR-камеры (рис. 7). Отражающая способность пигментов – изумрудной зеленой и цинковых белил, определяющих цвет красочных слоев верхнего изображения (слои 1–3 на рис. 6, б), напротив, меньше в длинноволновой части спектра (более 1,4 мкм), что способствует лучшему пропусканию в SWIR-диапазоне (рис. 7).

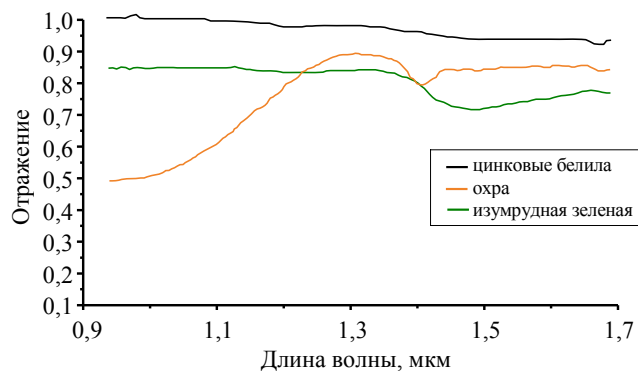


Рис. 7. Спектры отражения цинковых белил, охры и изумрудной зеленой в SWIR-диапазоне [23]

Важно отметить, что цинковые белила в диапазоне 0,95–1,4 обладают отражением, близким к 100 %, что при достаточно большой толщине этого слоя (см. рис. 6, б) должно делать его непрозрачным в ближнем ИК-диапазоне. Тем не менее, элементы букета, хотя и менее отчетливо, чем в SWIR, но всё же наблюдаются и в ближнем ИК-диапазоне (см. рис. 5, б) в области правее зоны пробоотбора. Такой эффект может объясняться низкой сплошностью и однородностью слоя цинковых белил в области букета.

Заключение

Проведенные исследования с использованием отечественной матричной камеры коротковолнового ИК-диапазона демонстрируют высокую эффективность по сравнению с камерой ближневолнового ИК-диапазона при исследовании предметов живописи, выполненных в различных техниках, что делает её незаменимым инструментом при выполнении полномасштабных комплексных исследований произведений живописи.

Для используемой в SWIR-камере матрицы максимум чувствительности достигается на длине волны 1,55 мкм, при этом тонкие красящие слои различного состава в сочетании с высокой отражающей способностью грунта позволяют обеспечить высокую яркость изображения даже при низком уровне внешней освещенности. Это позволяет полностью избежать рисков при работе с произведениями искусства, для которых чрезмерная освещенность или возможный нагрев за счет теплового воздействия источников света может приводить к необратимой деградации.

Поскольку красочные слои имеют достаточно сложный состав, различную однородность и сплошность, заранее предсказать возможность наблюдения скрытых элементов изображения не всегда возможно. Вместе с тем, расширение экспериментальных данных о спектральных характеристиках отдельных пигментов, а также прозрачности и отражающей способности красочных слоев на основе смесей пигментов в дальнейшем позволит разработать методику съёмки с применением узкополосных фильтров для более информативного исследования объектов живописи методом ИК-рефлектографии.

В ходе проведенного исследования выявлены скрытые элементы изображения произведений живописи в спектральном диапазоне 0,9–1,7 мкм. На иконе «Чудо Георгия о змие» (первая треть XVIII века) под поздними красочными слоями обнаружены скрытые авторские надписи и буквенные обозначения, сделанные иконописцем на подготовительной стадии работы. На картине «Натюрморт с кетой» (М. Соколов, 1930-е гг.) обнаружены детали изображения, позднее закрашенные самим автором произведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология и исследование произведений станковой и настенной живописи / под. Ред. Гренберга Ю. И. – М.: ГосНИИ реставрации, 2000.
2. *van Asperen de Boer J. R. J.* // Appl. Opt. 1968. Vol. 7. № 9. P. 1711.
3. *van Asperen de Boer J. R. J.* // Stud. Conserv. 1966. Vol. 11. № 1. P. 45.
4. *Beck L.* // Radiocarbon. 2013. Vol. 55. № 3–4. P. 436.
5. *Falco C. M.* // Rev. Sci. Instrum. 2009. Vol. 80. № 7. P. 071301.
6. *Gavrilov D. et al.* / Proc. 9th International Conference of NDT of Art. 2008.
7. *Striova J. et al.* // Angew. Chemie Int. Ed. 2018. Vol. 57. № 25. P. 7408.
8. *Buxbaum G., Pfaff G.* Industrial Inorganic Pigments: Third Edition. – Michigan: Willey, 2005.
9. *Mercuri F. et al.* // Archaeometry. 2021. Vol. 63. № 5. P. 1009.
10. *Betts P. et al.* // Microsc. Microanal. 2021. Vol. 27. № 1. P. 3008.
11. *Cazzaniga I. et al.* // Coatings. 2021. Vol. 11. № 2. P. 150.
12. *Li G. H. et al.* // Microchem. J. 2020. Vol. 155. № 8. P. 104699.
13. *Fontana R. et al.* // O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology. 2007. Vol. 6618. P. 661813.
14. *Daffara C. et al.* // Acc. Chem. Res. 2010. Vol. 43. № 6. P. 847.
15. *Sugawara S. et al.* // Infrared Phys. Technol. 2021. Vol. 117. P. 103809.
16. *Walmsley E. et al.* // Stud. Conserv. 1994. Vol. 39. № 4. P. 217.
17. *Cosentino A.* // Herit. Sci. 2014. Vol. 2. № 1. P. 8.
18. *Пономаренко В. П.* Квантовая фотосенсорика. – М.: АО «НПО «Орион», 2018.
19. *Пономаренко В. П., Бурлаков И. Д., Попов В. С., Попов С. В.* Успехи инфракрасной фотосенсорика. – М.: АО «НПО «Орион», 2021.
20. *Gargano M., Ludwig N., Poldi G.* // Infrared Phys. Technol. 2007. Vol. 49. № 3. P. 249.
21. *Хамидуллин К. А. и др.* // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 95.
22. *Gaffey S. J.* // Am. Mineral. 1986. Vol. 71. № 1–2. P. 151.
23. Pigments Checker v.5 FREE Spectra Databases // Cultural Heritage Science Open Source – CHSOS. 2022.02.02 URL: <https://chsopensource.org/pigments-checker/>.
24. *Cloutis E. et al.* // J. Near Infrared Spectroscopy. 2016. Vol. 24. № 2. P. 119.

PACS: 85.60.–g

Infrared reflectography of artworks with SWIR camera at wavelengths of 0.9–1.7 μm

V. S. Popov^{1,2}, D. S. Pershin^{3,4}, P. A. Khrabrov¹, E. A. Morozova³, and V. P. Ponomarenko^{1,2}

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

³ State Research Institute for Restoration
Bd. 1, 44 Gastello st., Moscow, 107014, Russia

⁴ State Tretyakov gallery
Bd. 4, 10 Lavrushinsky per., Moscow, 119017, Russia

Received February 01, 2022

The study of the icon "The Miracle of George about the Serpent" (the first third of the 18th century) and the painting "Still Life with chum" (M. Sokolov, 1930s) was carried out by infrared reflectography using the short wave infrared camera at wavelengths of 0.9-1.7 um. Hidden elements of the image that are not observed in the visible range are revealed.

Keywords: Infrared Reflectography, Infrared Imaging; SWIR, NIR, Artwork, Painting, Hidden Painting.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-23-33

REFERENCES

1. *Technology and research of easel and wall paintings* Ed. Yu. I. Grenberg (State Research Institute of Restoration, Moscow, 2000).
2. J. R. J. van Asperen de Boer. *Appl. Opt.* **7** (9), 1711 (1968).
3. J. R. J. van Asperen de Boer, *Stud. Conserv.* **11** (1), 45 (1966).
4. L. Beck, *Radiocarbon* **55** (3–4), 436 (2013).
5. C. M. Falco, *Rev. Sci. Instrum.* **80** (7), 071301 (2009).
6. D. Gavrilov et al., in *Proc. 9th International Conference of NDT of Art. 2008*.
7. J. Striova et al., *Angew. Chemie Int. Ed.* **57** (25), 7408 (2018).
8. G. Buxbaum and G. Pfaff, *Industrial Inorganic Pigments: Third Edition*. (Wiley, Michigan, 2005).
9. F. Mercuri et al., *Archaeometry* **63** (5), 1009 (2021).
10. P. Betts et al., *Microsc. Microanal.* **27** (1), 3008 (2021).
11. I. Cazzaniga et al., *Coatings* **11** (2), 150 (2021).
12. G. H. Li et al., *J. Microchem.* **155** (8), 104699 (2020).
13. R. Fontana et al., *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology* **6618**, 661813 (2007).
14. C. Daffara et al., *Acc. Chem. Res.* **43** (6), 847 (2010).
15. S. Sugawara et al., *Infrared Phys. Technol.* **117**, 103809 (2021).
16. E. Walmsley et al., *Stud. Conserv.* **39** (4), 217 (1994).
17. A. Cosentino, *Herit. Sci.* **2** (1), 8 (2014).
18. V. P. Ponomarenko, *Kvantovaya fotosensorika* (Orion R&P Association, Moscow, 2018) [in Russian].
19. V. P. Ponomarenko, I. D. Burlakov, V. S. Popov, and S. V. Popov, *Successes of infrared photosensory* (Orion R&P Association, Moscow, 2021).
20. M. Gargano, N. Ludwig, and G. Poldi, *Infrared Phys. Technol.* **49** (3), 249 (2007).
21. K. A. Khamidullin et al., *Applied Physics*, No. 6, 95 (2017) [in Russian].
22. S. J. Gaffey, *Am. Mineral.* **71** (1–2), 151 (1986).
23. *Pigments Checker v.5 FREE Spectra Databases* // Cultural Heritage Science Open Source – CHSOS. 2022.02.02 URL: <https://chsopensource.org/pigments-checker/>.
24. E. Cloutis et al., *J. Near Infrared Spectroscopy* **24** (2), 119 (2016).