



## Метод прямой цифровой радиографии в изучении предметов живописи и искусства: современные возможности и достижения последних лет

Submitted 04.12.18  
Accepted 14.12.18

Возможности метода прямой цифровой радиографии получили существенное развитие в последние несколько лет, что связано как с прогрессом в производстве самих плоскопанельных детекторов, так и новыми возможностями специального программного обеспечения. В статье показаны возможности применения цифровой радиографии для исследования предметов живописи, связанные с получением высококонтрастных изображений путем накопления кадров и применением цифровой фильтрации изображений. Методика, реализующая просвечивание на двух энергиях, и специально разработанное программное обеспечение позволяют отличать краски по их составу независимо от толщины слоя краски на картине.

Сотрудники  
ООО «Цифровая радиография»,  
Санкт-Петербург

A. Ya. Grudsky<sup>1</sup>, A. V. Dech<sup>1</sup>

### Direct Digital Radiography for Investigation of Art and Painting Objects: Up-to-Date Potential and Progress in Recent Years

Significant progress of DR in recent years is based on the latest developments of both the flat panels and new software algorithms. New possibilities of DR in painting investigation using high contrast images and digital filtration are shown. Dual energy penetration method and special software algorithms were developed and used for separation of different types of paints independently from the paint thickness.

*Keywords: digital radiography, painting, Roentgen image, digital filtration, dual energy penetration method, special software*

ГРУДСКИЙ  
Александр Яковлевич  
Директор  
по развитию бизнеса



ДЕЧ  
Антон Викторович  
Ведущий инженер.  
Специалист II уровня  
по цифровой радиографии.  
Разработчик программ-  
ных комплексов цифровой  
радиографии. Стаж работы  
в области радиографии  
24 года



#### Введение

За последние несколько лет был достигнут существенный прогресс в развитии метода прямой цифровой радиографии (direct radiography), когда изображение просвечиваемого рентгеновским излучением объекта формируется на твердотельной матрице без использования промежуточного носителя, такого как традиционно применяемая до сих пор рентгеновская плёнка или запоминающая пластина (метод компьютерной радиографии) [1]. К основным преимуществам прямой цифровой радиографии следует отнести прежде всего высокую чувствительность контроля и большой динамический диапазон толщин изучаемого объекта, что наряду со специальным программным обеспечением позволяет существенно расширить возможности метода рентгеновского контроля.

Производителями плоских панелей прямого преобразования (DDA) также достигнут в последние годы существенный прогресс в улучшении пространственного разрешения: оно достигает

сегодня 50 мкм для детекторов достаточно большого размера. Развитие технологии CMOS позволило в последние годы также существенно понизить цены плоскопанельных детекторов. Всё это вместе открывает существенно новые возможности в использовании метода прямой цифровой радиографии в изучении предметов живописи и искусства [2]. Рассмотрим примеры, демонстрирующие основные преимущества плоскопанельных детекторов при изучении предметов живописи.

#### Получение изображений с высоким отношением контраста к шуму за счёт накопления кадров

Разработанные методики позволяют существенно и практически неограниченно увеличить отношение контраста изображения к шуму за счёт накопления кадров. Для получения этого преимущества необходима процедура калибровки детектора перед проведением исследования по темновому току и выявлению неоднородностей детектора

<sup>1</sup> Digital LLC, St. Petersburg, Russia; alexander.grudsky@gmail.com

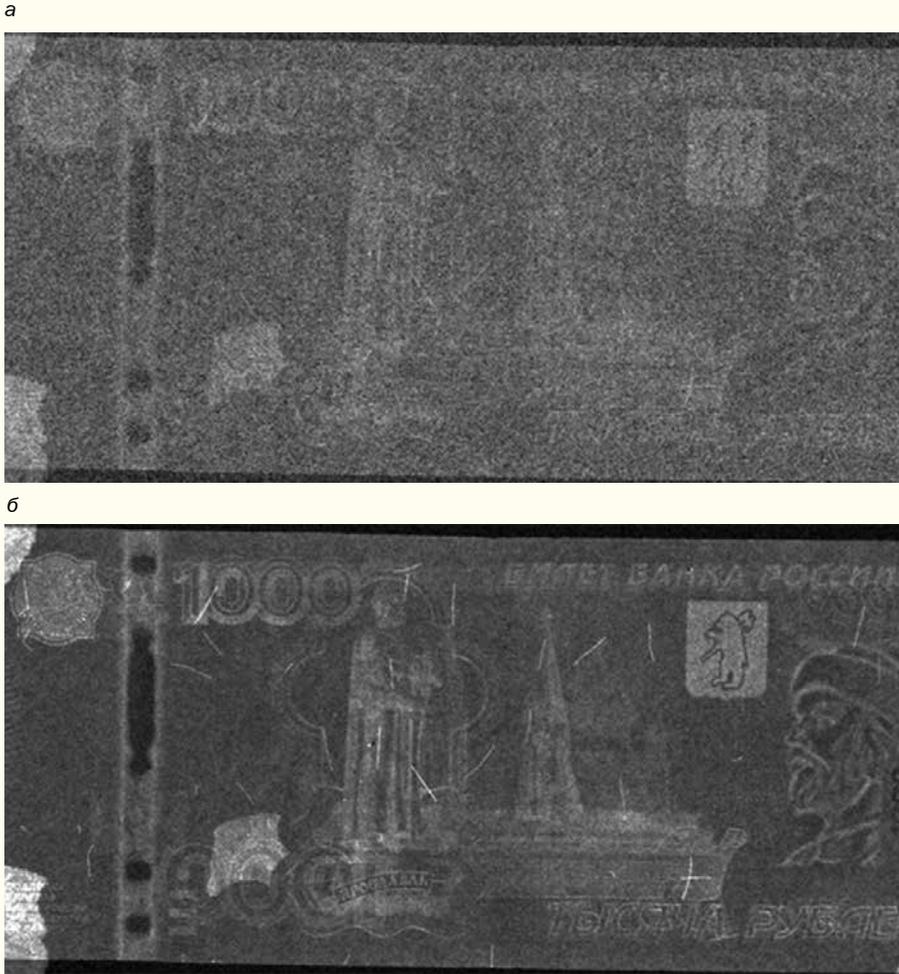


Рис. 1. Изображение банкноты 1000 рублей (экспозиция 1,5 с при 15 кВ и 6 мА), полученное накоплением двух кадров (а) и 50 кадров (б)

по его площади. Эти калибровки занимают совсем небольшое время, но являются необходимой частью процесса контроля. После проведения процедуры калибровки детектора можно практически неограниченно при достаточной величине сигнала на детекторе увеличивать отношение контраста изображения к шуму, что позволяет в конце концов увидеть те детали изображения, которые до этого были невидимы.

В качестве иллюстрации возможностей улучшения изображения за счёт накопления кадров на рис. 1а приведено изображение банкноты в 1000 рублей, полученное накоплением двух кадров по 1,5 с при напряжении на рентгеновской трубке 15 кВ и токе трубки 6 мА, а на рис. 1б — изображение этой же

банкноты при тех же параметрах просвечивания, но с накоплением 50 кадров по 1,5 с. Мы видим существенно больше деталей изображения с хорошей чёткостью. Отдельно приведено изображение хорошо видимого водяного знака.

**Применение цифровой фильтрации**

Существует достаточно много математических алгоритмов, которые используются для цифровой фильтрации изображений, позволяющих выявлять те или иные особенности изображений и проявлять те детали, которые невидимы глазом при просмотре исходного изображения. В качестве примера возможностей цифровой фильтрации на рис. 2 приведён объект просвечивания (детская

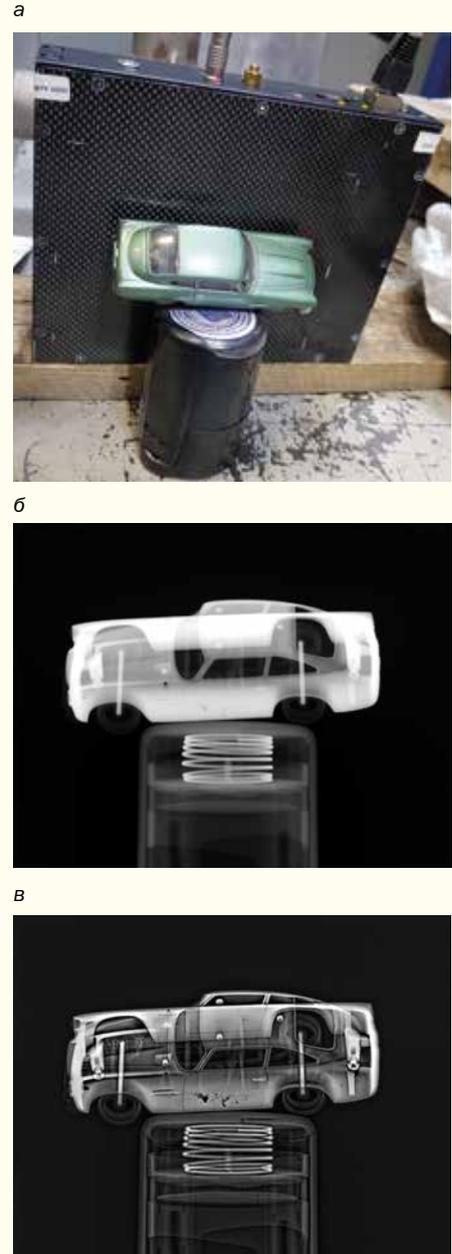
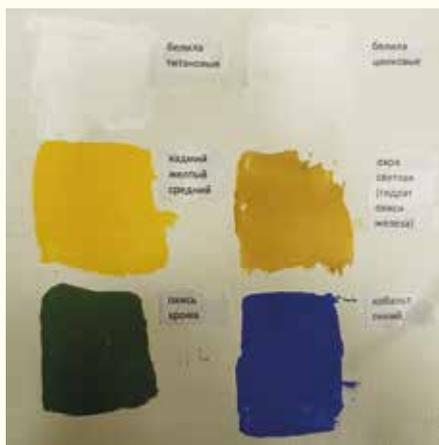
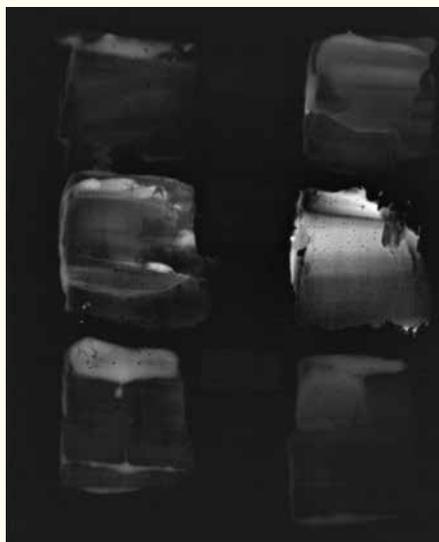


Рис. 2. Двухмерное изображение объекта, полученное с помощью плоскочувствительного детектора в рентгеновском излучении: а — объект просвечивания; б — исходное изображение; в — изображение после цифровой фильтрации; г — увеличенное изображение после цифровой фильтрации

а



б



в

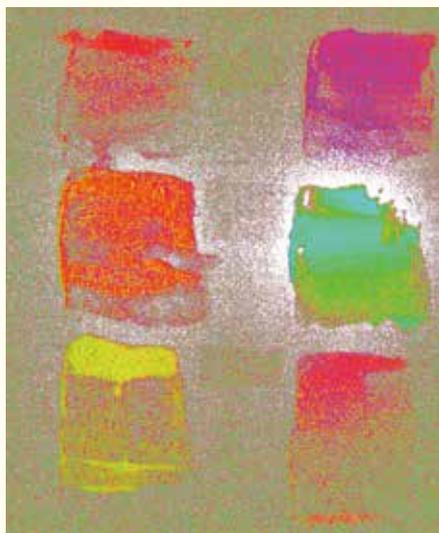


Рис. 3. Образец из шести разных по составу и толщине красок, нанесённых на холст: а — внешний вид; б — обычное рентгеновское изображение; в — изображение, полученное на двух разных энергиях и обработанное с помощью программного комплекса «ДиСофт — Искусство»

игрушечная машинка) и двумерное изображение этого объекта, полученное с помощью плоскостельного детектора, до и после цифровой фильтрации.

Видно, что цифровая фильтрация позволила не только существенно улучшить чёткость изображения, но и увидеть некоторые детали, которые невозможно было различить на исходном изображении. После цифровой фильтрации мы можем легко прочитать номер на внутренней стороне правого крыла машинки и коррозию на левой двери.

### Просвечивание на двух энергиях с последующей дифференциацией материалов

Просвечивание объекта на двух энергиях может дать возможность при правильном выборе параметров просвечивания и использовании специального программного обеспечения грубо оценить просвечиваемый материал независимо от толщины самого материала.

Без учёта рассеяния и при правильной фильтрации рентгеновского излучения и небольших энергиях (до 100 кВ) затухание излучения в образце можно приближённо считать экспоненциальным:

$$N = N_0 E^{D/\tau}, \quad (1)$$

где  $N$  — энергия прошедшего рентгеновского излучения;  $N_0$  — энергия падающего рентгеновского излучения;  $D$  — толщина материала;  $\tau$  — декремент затухания.

Если произвести измерения на двух разных энергиях и вычислить выражение  $\log [N^1/N_0^1] / \log [N^2/N_0^2] = \tau_1/\tau_2$ , (2) то получаем, что отношение этих логарифмов не зависит от толщины материала, а зависит только от свойств материала по ходу луча.

Варьирование энергий дает возможность наиболее эффективно дифференцировать разные материалы. Если на одном холсте используются разные краски, они тоже в достаточной степени могут быть разделены по составу.

В следующем примере применялся медно-свинцовый фильтр, и использовались анодные напряжения 50 и 100 кВ. На холст были нанесены разные по составу краски, причём образец каждой краски имел большую разнотолщинность. На рис. 3а показан исследованный образец из шести разных по составу красок, нанесённых на холст, а на рис. 3б приведено его обычное рентгеновское изображение. Хорошо видно, что образцы красок имеют разную толщину, но из полученного изобра-

жения нельзя сделать какие-либо выводы о количестве различных использованных красок и их составе.

После просвечивания на двух разных энергиях и обработки полученных изображений с помощью программного комплекса «ДиСофт — Искусство» мы получаем изображение, приведенное на рис. 3в, где достаточно легко можно отличить краски по их составу независимо от толщины слоя самих красок. При этом каждому материалу, на базе которого сделана краска, можно сопоставить свой цвет или уровень сигнала, выраженный числом: белила титановые — 242, кадмий жёлтый средний — 221, окись хрома — 174, белила цинковые — 279, охра светлая — 74, кобальт синий — 252 (близко к титановым белилам, но отличимо).

Заметим, что так как в знаменателе отношения (2) присутствует логарифм отношения интенсивностей, который при уменьшении толщины материала стремится к нулю, то метод начинает работать, начиная с некоторой толщины, которая зависит от характера самого материала.

### Заключение

В данной статье были показаны только некоторые возможности современной прямой цифровой радиографии. При выборе конкретного плоскостельного детектора для изучения предметов живописи или искусства важно сформулировать требования к контролю для того, чтобы выбрать оптимальное соотношение между техническими параметрами детектора и его стоимостью. Разработка специальных методов исследований наряду с использованием широких возможностей программного комплекса «ДиСофт — Искусство» позволит решить множество задач, которые до сих пор считались неразрешимыми и сделать невидимое видимым.

### Литература

1. Schreiner M., Fröhmann B., Jembrih-Simbürger D., Linke R. X-rays in art and archaeology — an overview. — *Advances in X-ray Analysis*. 2004. V. 47. Доступно: [http://www.icdd.com/resources/axa/vol47/v47\\_01.pdf](http://www.icdd.com/resources/axa/vol47/v47_01.pdf).
2. Hackett, J. X-radiography as a tool to examine the making and remaking of historic quilts. — *Victoria & Albert Online J.* 2011. No. 3. Доступно: <http://www.vam.ac.uk/content/journals/research-journal/issue-03/x-radiography-as-a-tool-to-examine-the-making-and-remaking-of-historic-quilts/>.

Статья получена 4 декабря 2018 г., в окончательной редакции — 14 декабря