



УДК 621.386.2

В. Б. Бессонов, А. В. Ободовский, А. Ю. Грязнов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

И. А. Бойко
ЗАО «Светлана-Рентген» (Санкт-Петербург)

Технология микрофокусной рентгенографии при исследовании археологических памятников, музейных объектов и произведений искусства

Рассматриваются физико-технические основы метода рентгенографии с прямым геометрическим увеличением объекта исследования (микрофокусный способ). Рассматриваются особенности получения рентгеновских снимков на аппаратах с протяженным и точечным фокусным пятном. Приводятся результаты исследований археологических объектов и музейных ценностей методом микрофокусной рентгенографии.

Рентгенография, микрофокусная рентгенография, дефектоскопия, геометрическое увеличение, фокусное пятно

Рентгеновское излучение успешно применяется для определения подлинности произведений искусства, музейных ценностей и других объектов культурного наследия. Хорошо известны методы рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализов, позволяющие с высокой точностью на малых количествах вещества определить физическое строение (на атомарном уровне) и химический состав материалов, из которых были созданы произведения искусства. В последнее время к ним прибавился рентгенографический метод просвечивания объектов с увеличением изображения, широко используемый в ряде областей медицины для получения рентгеновских изображений органов, детали строения которых имеют минимальные размеры – от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров [1].

В отличие от рентгеновской микроскопии, предметом исследования которой являются специально подготовленные образцы или фрагменты малого размера произведений искусства, метод съемки с увеличением изображения позволяет исследовать внутреннее строение объектов с той же разрешающей способностью, не нарушая их целостности и независимо от их конечных размеров [2].

Традиционно рентгенография объектов исследования выполняется контактным способом съемки (стандартная рентгенография). При съемке контактным способом (рис. 1, а) используется источник излучения 1 с протяженным фокусным пятном d ($d_1 \approx 1$ мм) [3]. Объект съемки 2 располагается на достаточно большом расстоянии f от источника излучения и вплотную – «в контакте» к приемнику излучения 3. На рис. 1 приводится рентгенооптическая схема стандартной рентгенографии (а – контактная съемка; б – способ с прямым геометрическим увеличением). Хорошо видно:

– что размер фокусного пятна d , а также расстояние между источником излучения и объектом f существенно влияют на качество (нерезкость H_r) изображения. Величина расстояния f выбирается, исходя из требований к величине нерезкости получаемых снимков, с учетом конкретных размеров фокусного пятна рентгеновской рубки d_1 и толщины объекта;

– даже незначительное удаление приемника излучения от объекта съемки на расстояние $\Delta f = f - f_1$ приводит к значительному ухудшению качества

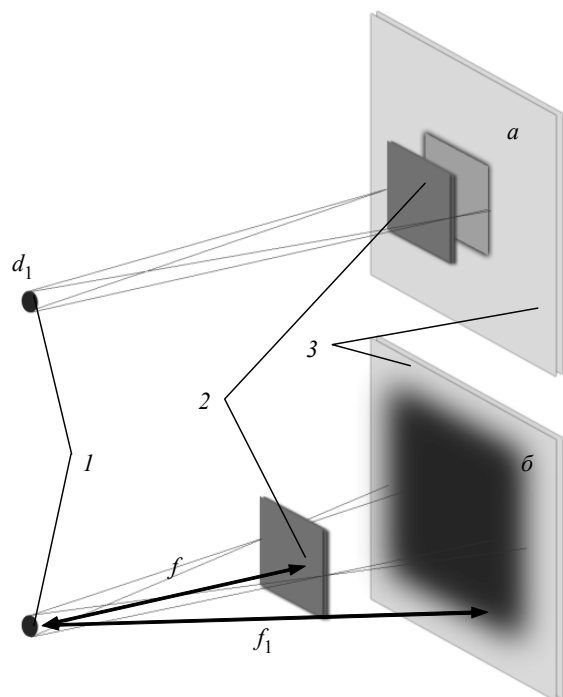


Рис. 1

снимка вследствие увеличения нерезкости H_T (рис. 1, б). Очевидно, что для уменьшения нерезкости изображения необходимо увеличивать расстояние между объектом и приемником излучения.

При съемке с увеличением изображения (рис. 2) используется так называемый точечный источник излучения 1 с фокусным пятном d микронных размеров ($d_2 \leq 0.1$ мм). Объект съемки 2 располагается на определенном расстоянии как от источника, так и от приемника излучения 3 . Независимо от того, в каком положении находится объект съемки в пространстве между фокусным пятном источника излучения и плоскостью приемника, резкость полученного изображения будет сохраняться (рис. 2, б) [4].

Отношение расстояний f и f_1 определяет коэффициент увеличения изображения объекта m по сравнению с его истинными геометрическими размерами:

$$m = f_1 / f.$$

Рентгенография с помощью микрофокусных источников рентгеновского излучения получила определение «микрофокусная рентгенография». В настоящее время микрофокусная рентгенография находит широкие области применения, рассмотренные, например, в [5]–[7]. Для демонстрации преимуществ микрофокусной рентгенографии по сравнению со стандартной рентгенографией

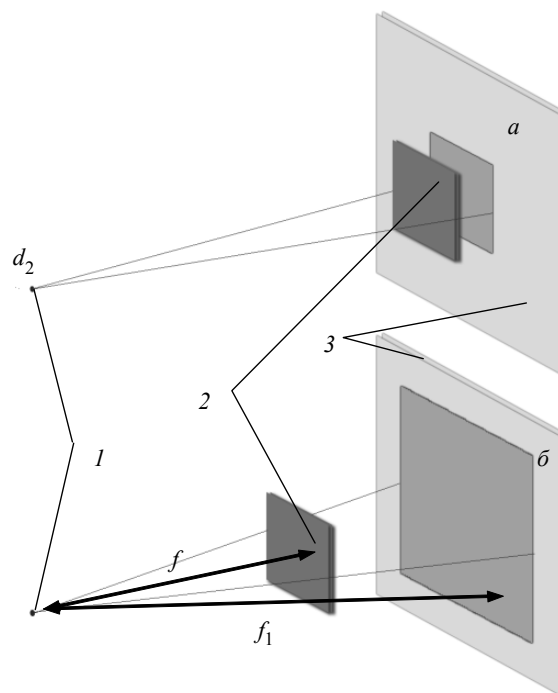


Рис. 2

использован тест-объект (скелетированная голова кошки), содержащий детали строения размером от нескольких десятков микрон (рис. 3).

На рис. 4 представлены рентгеновские снимки тест-объекта, полученные по методике стандартной рентгенографии на аппарате с фокусным пятном $d \approx 1$ мм без увеличения изображения – контактно (рис. 4, а) и с увеличением в 2, 4 и 8 раз (рис. 4, б, в и г соответственно).

С ростом коэффициента увеличения изображения информативность снимков существенно уменьшается по сравнению с контактным снимком вследствие возникающей нерезкости изображения.

На рис. 5 представлены рентгеновские снимки того же тест-объекта, полученные по методике микрофокусной рентгенографии на аппарате с фокусным пятном $d \leq 0.1$ мм без увеличения изображения (рис. 5, а) и с увеличением в 2, 4 и

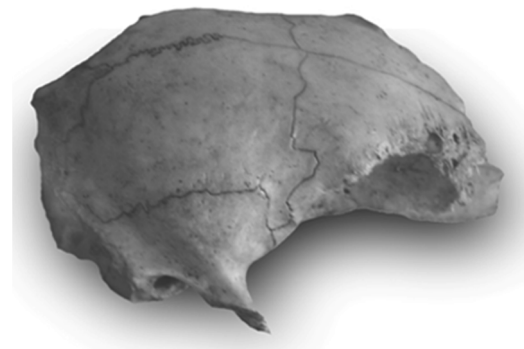


Рис. 3

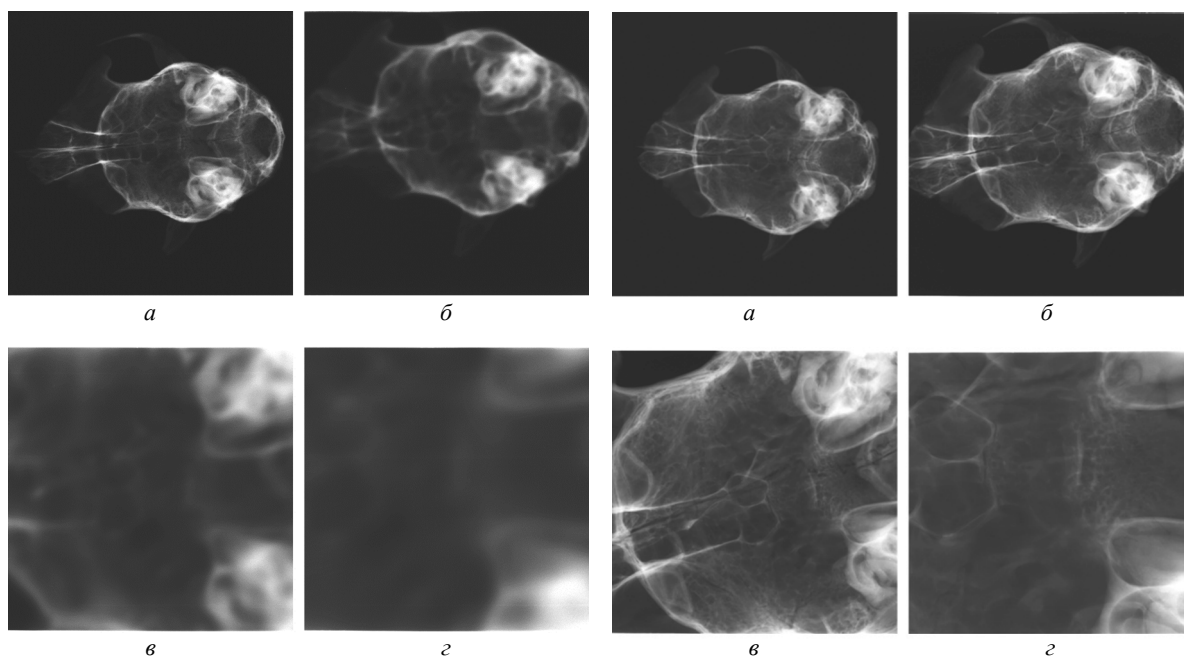


Рис. 4

Рис. 5

8 раз (рис. 5, б, в и г соответственно). На микрофокусных снимках с увеличением изображения не только сохраняется резкость, но и обнаруживаются новые детали строения объекта, неразличимые на контактном снимке.

Технология микрофокусной рентгенографии археологических памятников, музейных объектов и произведений искусства включает в себя методику микрофокусной съемки и специализированные технические средства для ее реализации [8], [9]. Методика съемки двухэтапная: на первом этапе проводится контактная съемка для оценки общего строения объекта исследования и определения «зон интереса», на втором – съемка с увеличением изображения отдельных участков объекта для получения новой или дополнительной информации о его строении.

Проверка работоспособности методики при исследованиях археологических находок производилась на крупном фрагменте свода черепа, сос-

тоявшем из лобной и теменных костей, найденных в погребении 2 кургана 2 Студеновского могильника по правому берегу реки Терешки примерно в 50 км к северу от Саратова (раскопки 1969 г. под руководством И. В. Сеницына и В. А. Фисенко). По степени развития надбровных дуг и общей относительной массивности черепной крышки пол индивидуума определен как мужской. По состоянию черепных швов, возраст мужчины оценен как молодой (категория *adultus*, 25–35 лет) [10].

Изучались следы двух травматических повреждений (рис. 6 и 7) черепа с целью уточнения сроков их нанесения. На специальных технических средствах были получены снимки с увеличением изображения в 3 раза, которые позволили аргументированно предположить возможность нанесения обеих травм в одном сражении и, соответственно, причину преждевременной кончины индивидуума.

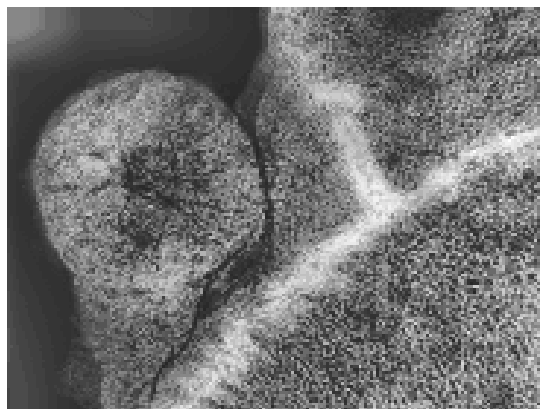


Рис. 6

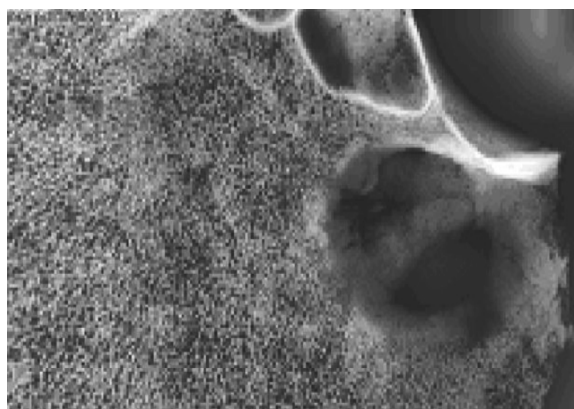


Рис. 7

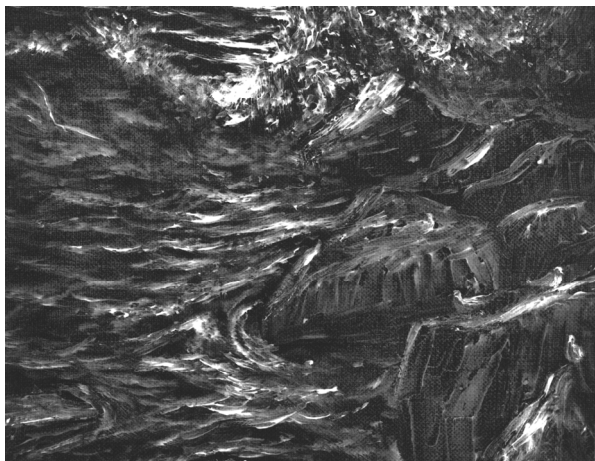


Рис. 8

Микрофокусная рентгенография эффективна при атрибуции произведений живописи путем сравнительного анализа рентгеновских изображений изучаемого произведения с рентгеновскими изображениями подлинных картин художника.

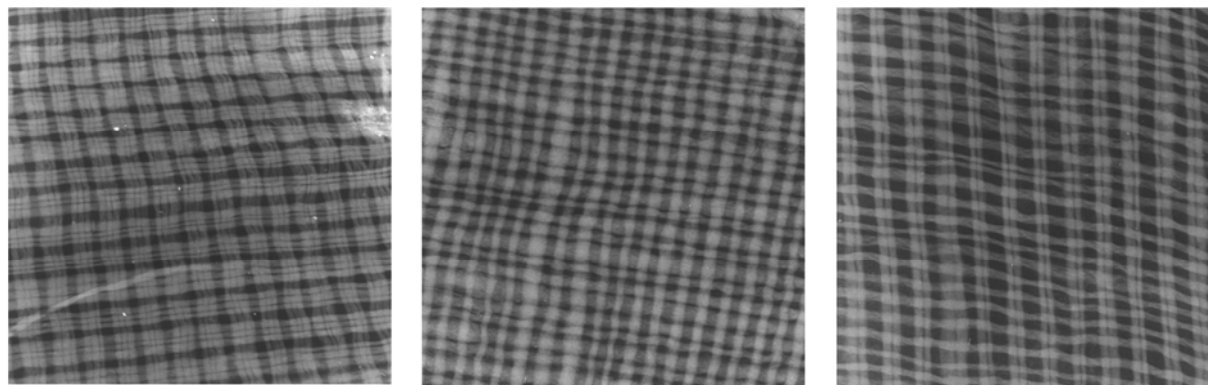


Рис. 9

Возможность получения резких увеличенных изображений отдельных участков картины позволяет выявить и изучить особенности живописных

приемов, нижележащие изображения, области разрушения или реставрационного вмешательства, что обеспечивает высокую вероятность определения участков авторской живописи. На рис. 8 представлен микрофокусный контактный рентгеновский снимок картины, написанной масляными красками.

На рис. 9 представлены микрофокусные снимки с увеличением изображения, выполненные при исследовании структуры холста картин. Полученные изображения позволяют уверенно идентифицировать разные типы плетения ткани.

Как показывает практика, в современных условиях всестороннее изучение объектов культурного наследия является важной и актуальной задачей, требующей разработки новейших методов исследования и аппаратуры для их реализации. Технология микрофокусной рентгенографии, обеспечивающая принципиально большие

диагностические возможности по сравнению с технологией стандартной рентгенографии, является одним из таких методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грязнов А. Ю., Потрахов Е. Н., Потрахов Н. Н. Цифровая микрофокусная рентгенография в клинической практике // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2-3. С. 163-166.
2. Микрофокусная рентгенография – от прошлого к будущему / А. Ю. Васильев, Н. С. Серова, И. М. Буланова и др. // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2-3. С. 19-25.
3. Сравнительная оценка информативности цифровой микрофокусной рентгенографии с многократным увеличением изображения и радиовизиографии в эксперименте / В. Г. Алпатова, А. Ю. Васильев, Л. П. Кисельникова и др. // Клиническая стоматология. 2010. № 1. С. 23-24.
4. Влияние размеров фокусного пятна рентгеновской трубки на разрешающую способность радиовизиографа / Н. Н. Блинов, А. Ю. Васильев, А. Ю. Грязнов и др. // Медицинская техника. 2014. № 2. С. 2-4.
5. Жамова К. К., Бессонов В. Б., Грязнов А. Ю. Возможности микрофокусной маммографии с прямым увеличением изображения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 1. С. 71-72.
6. Медникова М. Б., Потрахов Н. Н., Бессонов В. Б. Применение микрофокусной рентгенографии в разграничении ископаемых представителей рода *Ното* с архаической и современной морфологией // Биотехносфера. 2013. № 4. С. 56-60.
7. Рентгенографический анализ качества семян овощных культур / Ф. Б. Мусаев, О. А. Прозорова, М. В. Архипов и др. // Овощи России. 2012. № 4. С. 43-47.
8. Грязнов А. Ю., Потрахов Е. Н., Потрахов Н. Н. Портативная установка для рентгеновского экспресс-контроля качества пищевой продукции // Биотехносфера. 2009. № 6. С. 26-28.

9. Потрахов Е. Н. Микрофокусная рентгенография – инновационная технология медицинской диагностики // Медицинская техника. 2012. № 5. С. 44–47.

10. Применение микрофокусной рентгенографии при диагностике заболеваний древнего человека /

А. П. Бужилова, М. В. Добровольская, М. Б. Медникова и др. // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2–3. С. 152–162.

V. B. Bessonov, A. V. Obodovsky, A. Yu. Gryaznov
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

I. A. Boyko
ZAO «Svetlana-X-Ray» (Saint-Petersburg)

MICROFOCUS X-RAY RADIOGRAPHY IN THE STUDY OF ARCHAEOLOGICAL SITES, MUSEUM OBJECTS AND WORKS OF ART

This article covers physical and technical principles of the radiography method with direct geometric magnification of the object (microfocus radiography). Features of obtaining X-ray images on devices with extended and point focal spot are discussed. Results of studies of archaeological sites and museum objects with microfocus X-ray radiography method are shown.

X-ray radiography, microfocus X-ray radiography, X-ray inspection, geometric magnification, focal spot

УДК 533.9.08

А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Особенности анализа состава плазмы с помощью малогабаритного оптического спектрометра

Рассмотрены особенности применения малогабаритного оптического спектрометра для анализа состава плазмы. Описаны возможности разработанного программного обеспечения для идентификации спектральных линий в спектре излучения. Рассмотрены сложности, возникающие при анализе спектров излучения плазмы сложного состава.

Эмиссионная спектроскопия, оптический спектрометр, состав плазмы, спектральная линия

Оптическая эмиссионная спектроскопия широко применяется для контроля ионно-плазменных процессов травления и осаждения материалов [1]–[6]. В них удаляемое или осаждаемое вещество находится в распыленной фазе и, испытывая соударения с электронами, частично переходит в возбужденное состояние. Обратный переход частиц из возбужденного состояния в основное сопровождается испусканием излучения, которое несет информацию о плотности возбужденных состояний атомов и молекул распыленного вещества и других компонентов газовой среды.

Основными преимуществами спектрометрических систем контроля являются: простота

встраивания в технологический процесс, отсутствие контакта с вакуумным объемом технологической камеры, высокая помехозащищенность, а также возможность наблюдения за параметрами процесса в реальном времени.

В случае если технологический процесс окончательно не отработан, для регистрации спектров можно использовать универсальный оптический спектрометр, например ISM3600, разработанный в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [7]–[10]. Для управления прибором и анализа спектров используется программное обеспечение (ПО) Aspect2010.

ПО поддерживает следующие функции: управление чувствительностью фотоприемника,