

## ФИЗИКА

УДК 539.184;621.382.2;621.384

Член-корреспондент Ф. Ф. КОМАРОВ<sup>1</sup>, А. С. КАМЫШАН<sup>1</sup>,  
В. В. ПИЛЬКО<sup>1</sup>, П. А. ГРИШИН<sup>1</sup>, Г. А. УРЬЕВ<sup>2</sup>

**СПЕКТРОМЕТР ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
С ИОННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**<sup>1</sup>Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ, Минск<sup>2</sup>РНПЦ травматологии и ортопедии

Министерства здравоохранения Республики Беларусь, Минск

Поступило 16.04.2014

**Введение.** Метод рентгеноспектрального анализа с ионным возбуждением возник как соединение традиционных рентгеноспектральных методов исследования твердых тел и методов, основанных на применении пучков ускоренных ионов. Как известно, традиционными способами возбуждения рентгеновских квантов являются облучение исследуемого образца пучком электронов или рентгеновским излучением. Возбуждение характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) тяжелыми частицами известно практически со времен открытия радиоактивности. В настоящее время при рентгенографическом анализе используются  $\alpha$ -частицы радиоактивных источников. Однако низкая активность излучателей, монохроматичность и невозможность изменять энергию частиц ограничивают пороговую чувствительность анализа, а для снятия энергетического спектра требуется значительное время.

Ситуация резко улучшается, если для возбуждения рентгеновского излучения использовать сфокусированные пучки ионов, получаемые на ускорителях:

- а) за счет повышения интенсивности пучка сокращается время экспозиции;
- б) изменяя энергию можно получить оптимальные условия возбуждения для исследуемого сорта атомов;
- в) низкий фон тормозного излучения по сравнению с возбуждением ХРИ электронами;
- г) в силу того, что ионы тормозятся в пределах тонкого приповерхностного слоя  $\sim 1$  мкм, а в ряде случаев в слое толщиной порядка 0,01 мкм (тяжелые ионы с энергией меньше 1 МэВ), метод идеально подходит для исследования тонких образцов, содержащих малое количество исследуемого состава, а также послойного анализа массивных объектов;
- д) применение современных полупроводниковых детекторов с энергетическим разрешением в несколько сот эВ и диапазоном измеряемых энергий до 60 кэВ позволяет проводить анализ ряда элементов при одном измерении. При этом возможна высокая степень автоматизации измерений.

Цель работы – создание на базе электростатического ускорителя ионов спектрометра ХРИ для определения элементного состава твердых тел, в том числе и биологического происхождения, и проверка его работоспособности на различного вида объектах.

**Состав и энергетическое разрешение спектрометра.** Спектрометр ХРИ создан на базе электростатического ускорителя ионов AN-2500, позволяющего получать ионные пучки водорода и гелия с монохроматичностью не более 0,1 % и плотностью тока на мишени от  $1,25 \cdot 10^{-7}$  до  $1,25 \cdot 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup> в диапазоне энергий от 500 до 2500 кэВ

Структурная схема спектрометра приведена на рис. 1. Блоки 10 и 11 в структурной схеме спектрометра предназначены для регистрации количества ионов, падающих на исследуемую

мишень. В качестве регистрирующего блока используется Si(Li) детектор с предварительным усилителем производства фирмы ORTEC (США). Его параметры:

энергетическое разрешение на линии 5,9 кэВ, эВ 150  
 энергетический диапазон регистрации, кэВ (1–60)  
 нелинейность на 90 % динамического диапазона, %

не более 0,05

коэффициент преобразования, мВ/кэВ 1,3

напряжение смещения, В –1500

диаметр входного окна, мм 20

толщина входного окна, мкм 0,1

Энергетическое разрешение спектрометра определялось с использованием источника  $^{55}\text{Fe}$  типа ОСГИ-3х активностью 9 кБк. На рис. 2 приведен энергетический спектр этого источника, измеренный нашим спектрометром. Источник  $^{55}\text{Fe}$  имеет две линии с энергиями 5,9 и 6,49 кэВ и выходом 24,9 и 3,4 % соответственно. Из рис. 2 следует, что площади под пиками согласуются с величинами соответствующих выходов и энергетическое разрешение спектрометра, измеренное по линии 5,9 кэВ, составляет 151 эВ (паспортное значение разрешения детектора – 150 эВ).

**Результаты и их обсуждение.** Для проверки работоспособности спектрометра ХРИ нами были измерены энергетические спектры ХРИ металлического держателя мишени и срезов костной ткани, предоставленных ГУ «Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии».

На рис. 3 приведен спектр ХРИ, возбужденный протонами с энергией 1 МэВ в материале держателя мишеней. Ток ионного пучка составлял 3 нА.

Видно, что приповерхностный слой мишенедержателя состоит из десяти элементов. Следует отметить, что такие элементы, как хлор, калий в состав материала мишенедержателя не входят и их следы остались от использовавшихся мишеней. Кроме того, в спектре практически не наблюдается фона, что свидетельствует о преимуществе возбуждения ХРИ ионными пучками.

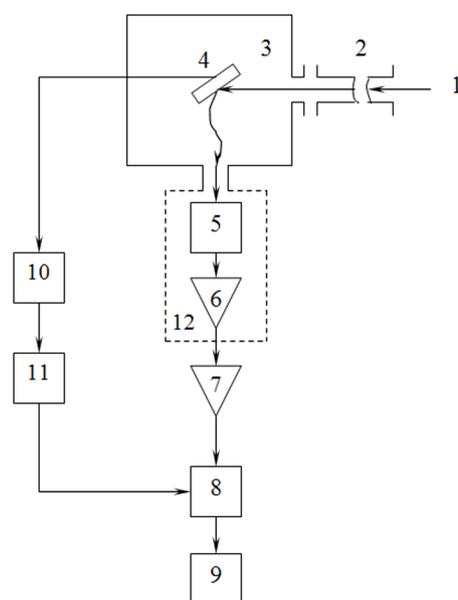


Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса: 1 – ионный пучок после магнита-сепаратора; 2 – ионопровод; 3 – мишенная камера; 4 – образец; 5 – Si(Li) детектор; 6 – предусилитель; 7 – усилитель ORTEC 570; 8 – анализатор импульсов, встроенный в ПЭВМ; 9 – ПЭВМ; 10 – измеритель тока; 11 – преобразователь ток–частота; 12 – криостат

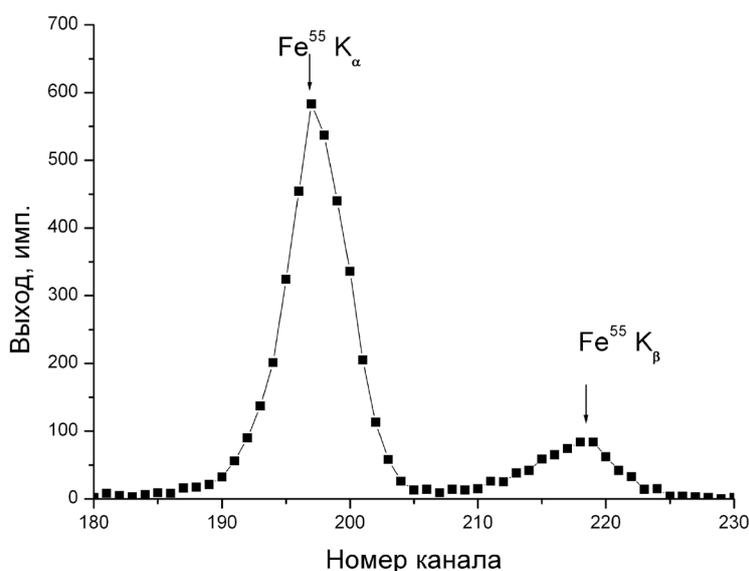


Рис. 2. Энергетический спектр излучения  $^{55}\text{Fe}$

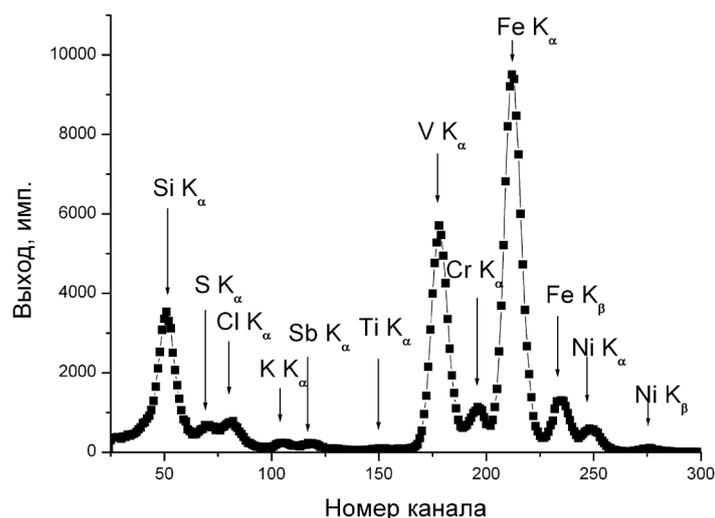


Рис. 3. Энергетический спектр ХРИ мишенедержателя

В качестве биологических исследуемых образцов использовались срезы костных тканей головки (дефектная ткань) и шейки бедра (здоровая ткань), взятые у прооперированных по поводу замены тазобедренного сустава больных коксартрозом. Основной метаболической функцией кости является поддержание минерального гомеостаза, поскольку большинство химических элементов использует костную ткань как депо. При различных патологических состояниях, вызванных нарушением как структуры кости, так и общего состояния организма происходит перераспределение минерального состава костного матрикса, сопровождающееся накоплением, потерей или перераспределением минеральной фазы ткани. Таким образом, оценка распределения химических элементов в костной ткани может свидетельствовать о функциональном состоянии кости [1; 2]. Размеры среза составляли порядка  $10 \times 10 \times 3$  мм. Образцы помещались в измерительную камеру, в которой создавался вакуум  $(4-5) \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. В качестве генерирующих ХРИ ионов использовались ионы водорода с энергией 1 МэВ. Ток ионного пучка на мишени составлял 10 нА.

Измерения энергетических спектров срезов костных тканей проводились при равных количествах ионов, попавших на образец, с целью проведения достоверного сравнения энергетических спектров от больных и здоровых тканей.

На рис. 4 приведены спектры ХРИ костных тканей больного коксартрозом 3 степени. Из рисунка следует, что спектр состоит из шести линий, соответствующих химическим элементам: Al, P, Ca, Cr и Fe. Линия Al  $K_{\alpha}$  появилась вследствие рассеяния ионного пучка на входном коллиматоре и ее интенсивность зависит от его траектории. Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что ин-

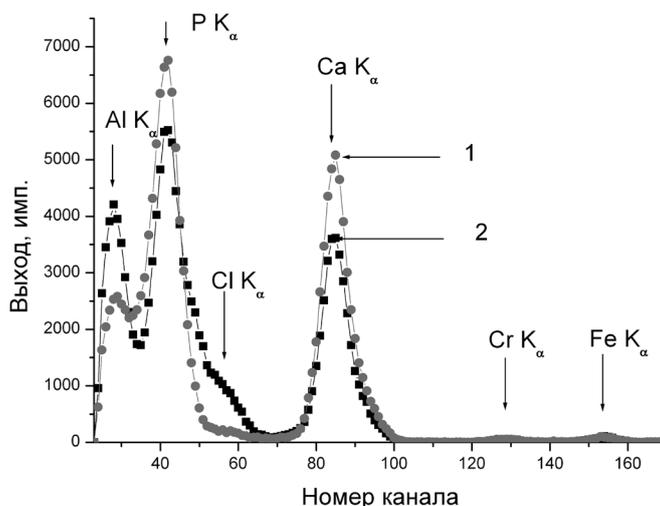


Рис. 4. Энергетические спектры ХРИ костной ткани: 1 – шейка бедра; 2 – головка бедра

тенсивность линий фосфора и кальция у больной ткани уменьшается на 20 и 30 % соответственно. В то же время существенно, почти в пять раз, возрастает количество хлора, что свидетельствует о наличии солевых отложений в больной ткани. Отсутствие в спектрах ХРИ линии натрия связано с тем, что энергия линии Na  $K_{\alpha}$  равна 1,03 кэВ и находится ниже порога регистрации рентгеновских квантов спектрометром.

**Заключение.** Полученные экспериментальные результаты доказывают возможность использования созданного на базе электростатического ускорителя ионов спектрометра ХРИ для исследования элементного состава приповерхностных слоев твердотельных материалов промышленного назначения, а также биологических объектов.

### Литература

1. *Frost H. M.* // The anatomical record. 1996. Vol. 244. P. 139–147.
2. *Schoenau E.* // Calcif Tissue Int. 2002. Vol. 70. P. 405–407.

*F. F. KOMAROV, A. S. KAMYSHAN, V. V. PILKO, P. A. HRYSHYN, G. A. URJEV*

KomarovF@bsu.by

### ION EXCITATION CHARACTERISTIC X-RAY SPECTROMETER

### Summary

An ion excitation characteristic X-ray spectrometer was created on the basis of an ion electrostatic accelerator AN-2500. The energy resolution of the spectrometer measured on the 5.9 keV line of the  $^{55}\text{Fe}$  spectrometric source is about of 151 eV. The characteristic X-ray spectra of the bony tissue section, which were affected to coxarthrosis, were measured. It is shown that the intensity of P and Ca spectral lines in the sick tissue is reduced by 20 and 30 %, respectively. Meanwhile, the amount of chlorine increases almost five times, which indicates the accumulation of salts in the sick tissue.