



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

3512 / 2-80

28/7-80
P15-80-210

А.И.Воложин, В.С.Евсеев, В.С.Роганов,
Б.М.Сабилов, В.С.Шашков, П.Экштейн

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ
КОСТНОЙ ТКАНИ ЧЕЛОВЕКА

1980

Неразрушающие прижизненные методы элементного анализа тканей живых организмов, в том числе и человека, представляют большой интерес для исследования динамики водно-солевого обмена, характеризующей процесс приспособления организма к изменяющимся условиям существования. Такие методы могут быть использованы как для выработки норм здоровья, так и для исследования нарушения обмена веществ при различных патологических процессах. В последние годы в связи с развитием работ по освоению космического пространства пристальное внимание ученых привлечено к проблеме влияния невесомости и других факторов космического полета на нарушения минерального обмена в костной ткани /см., например, ^{1/} /.

В работах ^{2,3/} для исследования элементного состава организма животных и человека впервые был использован новый метод, основанный на закономерностях поведения в веществе нестабильных элементарных частиц - отрицательно заряженных мюонов. В отличие от всех других известных методов прижизненного элементного анализа новый метод позволяет получить количественную информацию о содержании десяти основных элементов /от углерода до кальция/ в любом выбранном участке /независимо от глубины/ организма животного или человека без нанесения ему заметного радиационного поражения.

Основные особенности метода, вкратце, сводятся к следующему. Мюоны высокой энергии, получаемые на ускорителе протонов, после замедления и остановки в избранном участке исследуемого образца /выделение участка производится путем изменения энергии мюонов в пучке и геометрических размеров и формы сечения пучка частиц/ испытывают захват на высокорасположенные орбиты вокруг атомов различных элементов, содержащихся в исследуемом участке образца. При переходах мюона на низко-расположенные орбиты происходит испускание характерного для каждого элемента мезорентгеновского излучения. Суммарная интенсивность линий К-серии какого-либо элемента пропорциональна вероятности атомного захвата мюона всеми атомами данного элемента. Закономерности атомного захвата отрицательных мюонов в различных условиях еще только устанавливаются ^{4/}. Поэтому сейчас невозможно утверждать, что интенсивность мезорентгеновского излучения пропорциональна только количеству атомов, захвативших мюоны. Однако в качестве первого приближения можно использовать предположение, что вероятность атом-

ного захвата пропорциональна произведению nZ^k , где n - количество атомов данного элемента, z - его атомный номер; показатель степени k меняется от $2/3$ до $4/3$ /по разным моделям⁴/. Это приближение представляется более справедливым для механических смесей атомов или химических соединений.

В работах^{2,3} исследовались изменения в содержании различных элементов, наступающие в результате воздействия на организм животных и человека длительного состояния невесомости или гипокинезии, в предположении о неизменности химического состава соединений, из которых состоят живые организмы. Поэтому вопрос о соответствии абсолютных весовых концентраций каждого из элементов тем значениям, которые получаются из данных по мезорентгеновским спектрам, там не ставился. В работе³, правда, обсуждается вопрос о том, что суммарная интенсивность мезорентгеновского излучения фосфора и кальция, регистрируемая при остановке мюонов в губчатой костной ткани, может достаточно хорошо представлять абсолютный вклад минеральной компоненты кости, поскольку минеральная и органическая компоненты кости представляют собой в некотором смысле механическую смесь, т.к. кристаллы гидроксиапатита, содержащие основные элементы минеральной компоненты /кальций и фосфор/, покрывают тонким слоем пластины органического соединения /коллагена/⁵/. В пользу неизменности химического состава минеральной компоненты кости при различных длительных неблагоприятных воздействиях на организм говорит тот факт³, что отношение интенсивностей мезорентгеновского излучения из кальция и из фосфора остается постоянным даже при существенном /до двух раз/ уменьшении суммарной интенсивности мезорентгеновского излучения из этих двух элементов, отражающем уменьшение минеральной насыщенности костной ткани.

Лучшим способом абсолютной калибровки мезорентгеновской методики является измерение элементного состава одного и того же образца сложного химического состава мезорентгеновским и другими хорошо отработанными физико-химическими методами. При этом могут быть получены поправочные коэффициенты, позволяющие получать из мезорентгеновских данных, например, весовые содержания различных элементов. То, что из мезорентгеновских данных можно прямо получить величины, примерно равные весовому содержанию элементов, следует из следующих оценок.

Для относительного вклада K -серии мезорентгеновского спектра i -го элемента $\frac{W_i}{\sum W_i}$ в предположении о том, что атомный захват мюонов происходит как в механической смеси, имеем: $\frac{W_i}{\sum W_i} = \frac{n_i Z_i^k}{\sum n_i Z_i^k}$. Поскольку $n_i \sim \frac{P_i}{A_i}$, где A_i - массовое число

i -го элемента и P_i - вес атомов этого элемента в образце, то $\frac{W_i}{\sum W_i} = \frac{P_i Z_i^k / A_i}{\sum P_i Z_i^k / A_i}$. Принимая во внимание, что для углерода, азота и кислорода, составляющих основную долю от веса любой ткани, отношение Z/A одно и то же с точностью 10^{-3} , а для других элементов с $A \leq 40$ это отношение отличается от такового для легких элементов на несколько процентов, получаем, что с точностью порядка 1% $\frac{W_i}{\sum W_i} = \frac{P_i}{\sum P_i}$, т.е. относительная интенсивность мезорентгеновского спектра i -го элемента в механической смеси равна относительному весовому содержанию данного элемента.

В работе⁶ был выполнен совместный анализ мезорентгеновским и обычными физико-химическими методами одних и тех же образцов /по углероду, азоту и кислороду/ различных тканей животных /мышца, жир и печень свиньи, печень и кость быка, печень и кровь собаки/. Различия в анализе двумя методами составляют, например, по содержанию углерода от одного до десяти процентов /при статистической погрешности мезорентгеновского метода около 1% и ошибке физико-химического анализа около 0,1%/. Основной причиной расхождения между результатами, полученными разными методами, авторы работы⁶ считают неправильный выбор проб для обычных методов анализа.

С целью получения калибровочных коэффициентов для некоторых элементов, составляющих основу минеральной компоненты губчатой части кости, мы провели измерения мезорентгеновского спектра образца, взятого из проксимального эпифиза бедренной кости практически здорового мужчины 45 лет, и провели анализ этого образца обычными методами.

Таблица 1

Содержание элементов на 100 г сырой костной ткани, определенное физико-химическими методами

№ пробы	Натрий, мг	Калий, мг	Кальций, г		Магний, мг	Фосфор, г
1	133,2	8,1	9,1		130,5	4,2
2	132,7	7,9	9,2		128,5	4,2
3	134,7	10,3	8,9		127,3	4,0
4	140,3	6,5	8,9		116,7	4,2
5	130,0	6,9	9,0		122,3	4,2

Образец кости был фиксирован в 2%-ном нейтральном формалине, приготовленном на дистиллированной воде. Вес образца - около 150 г. Аппаратура для измерения мезорентгеновского спектра описана в /7/. Определение относительной интенсивности мезорентгеновского излучения для углерода, азота, кислорода, натрия, фосфора и кальция была такой же, как и в работах /2,3/. Результаты приведены в табл.2.

Таблица 2

Сравнение весового содержания элементов /в%/, измеренного физико-химическими методами $\left(\frac{P_i}{\sum P_i}\right)_{\text{эксп.}}$, и относительной интенсивности мезорентгеновской K-серии тех же элементов $\left(\frac{W_i}{\sum W_i}\right)_{\text{эксп.}}$ в сырой костной ткани

Элемент	$\left(\frac{P_i}{\sum P_i}\right)_{\text{эксп.}}$	$\left(\frac{W_i}{\sum W_i}\right)_{\text{эксп.}}$	α
Na	0,134±0,004	0,29±0,04	0,46±0,07
P	4,16±0,09	2,39±0,12	1,74±0,10
Ca	9,03±0,13	10,05±0,77	0,90±0,08
Ca+P	13,9±0,07	12,44±0,78	1,12±0,07

Для химического анализа были взяты 5 фрагментов из разных участков образца. Материал взвешивали, высушивали до постоянной массы в термостате при температуре 80-100°C, озоляли в муфельной печи при температуре 700°C в течение 7 часов. Каждый фрагмент кости растирали в агатовой ступке, из золы готовили навески /по 3 из каждого фрагмента/. Зола растворяли в х.ч. соляной кислоте, в растворе определяли концентрацию кальция и магния на атомном адсорбциометре, натрия и калий - на пламенном фотометре, фосфор - на спектрофотометре с помощью молибдата аммония. Рассчитывали весовое содержание элементов на 100 г сырой ткани. Результаты приведены в табл.1. Результаты для тех же элементов, данные для которых получены мезорентгеновской методикой, приведены в табл.2 в виде средних по пяти фрагментам значений /ошибка - среднеквадратичная/.

Из табл.2 следует, что данные по натрию и фосфору, полученные разными методами, примерно вдвое расходятся, а по кальцию - в пределах статистической погрешности мезорентгеновской методики совпадают. Если в качестве характеристики содержания минеральной компоненты костной ткани брать /как это делалось в работе /3/ / суммарную интенсивность мезорентгеновского излучения фосфора и кальция, то в пределах 6%-ной

статистической погрешности мезорентгеновского метода эта величина совпадает с измеренным физико-химическим методом весовым содержанием этих основных элементов костной ткани. В четвертом столбце табл.2 приведены значения поправочных коэффициентов α , на которые надо умножить относительную интенсивность мезорентгеновского спектра данного элемента, чтобы получить его весовое содержание.

Полученные нами данные, так же как и данные для легких элементов /6/, свидетельствуют, что с точностью примерно ±7% минеральную компоненту кости и мягкие ткани можно с точки зрения атомного захвата рассматривать как компоненты механической смеси.

Относительные интенсивности мезорентгеновских спектров для легких элементов /углерода /39,5±1,0%/, азота /1,7±0,2% / и кислорода /46,1±1,0%/, а также отношение интенсивности мезорентгеновских спектров кальция и фосфора в пределах статистических погрешностей совпадают с измеренными ранее для губчатой части пяточной кости человека /3/.

Полученные нами данные следует рассматривать как предварительные, и в дальнейшем целесообразно провести специальные исследования элементного состава костной ткани двумя методами с учетом особенностей ее строения, механических свойств и функционального состояния. Представляется также интересным провести сравнительные измерения на кристаллах гидроксиапатита и некоторых аморфных соединениях фосфора и кальция.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воложин А.И. и др. "Патологическая физиология и экспериментальная терапия", 1979, №2, с.30; "Космическая биология и авиакосмическая медицина", 1974, 8, №1, с.68; Rambaut P. et al. Aerospace Med., 1973, 43, No.6, p.646; Vogel J.D., Whittle M.W. The Proc. of the Skylab Life Sciences Symp., 1974, 1, p.387.
2. Арльт Р. и др. ОИЯИ, 18-11844, Дубна, 1978.
3. Евсеев В.С. и др. ОИЯИ, 18-12286, Дубна, 1979.
4. Мезоны в веществе. Труды Международного симпозиума по проблемам мезонной химии и мезомолекулярных процессов в веществе. Дубна, 7-10 июня 1977 г. ОИЯИ, Д1,2,14-10908, Дубна, 1977, с.50,53,58,68,86,110.
5. Торбенко В.Л., Касавина Б.С. Функциональная биохимия костной ткани. "Медицина", М., 1977.
6. Hutson R.L. et al. Radiobiology, 1976, 120, p.193.
7. Акимов Ю.К. и др. ОИЯИ, 13-12021, 13-12022, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 марта 1980 года.