

Рентгеноспектральный микроанализ грудины при воронкообразных деформациях грудной клетки

Виктор Борисович Шамик*

Ростовский государственный медицинский университет,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Реферат

Цель. Изучение минерального состава грудины у пациентов с врождёнными воронкообразными деформациями грудной клетки.

Методы. Выполнен рентгеноспектральный микроанализ грудины у 10 пациентов с воронкообразной грудной клеткой в возрасте 14–17 лет (30 зон) на сканирующем электронном микроскопе с ускоряющим напряжением 25 кВ. Контролем служили результаты исследования грудины 3 пациентов 14–16 лет (10 зон), оперированных по поводу других заболеваний.

Результаты. Созданы графические изображения минерализации каждой исследуемой зоны грудины. В результате обработки графических данных системой IBAS-200 получены средние показатели орбиты атома, весового и атомарного процентов, весовой и фоновой интенсивности и их отношения, ошибки интенсивности элементов, входящих в состав минерального матрикса грудины. Структура грудины у основной и контрольной групп не различается. Преобладающие элементы — кислород (O), фосфор (P) и кальций (Ca). Их весовая интенсивность у больных и здоровых детей сопоставимого возраста составила соответственно: $101,16 \pm 2,78$ и $99,23 \pm 1,97$ ($p < 0,001$); $402,38 \pm 2,23$ и $421,28 \pm 1,99$ ($p < 0,001$); $586,41 \pm 2,37$ и $601,32 \pm 1,99$ ($p < 0,001$). Весовая интенсивность фосфора и кальция у здоровых детей выше на 2,5–4,5%, а кислорода — ниже на 1,9%. Важным показателем является соотношение весовой и фоновой интенсивности элементов.

Вывод. Весовая интенсивность фосфора и кальция у здоровых детей выше, в патогенезе возникновения деформации грудной клетки грудина меняет свою форму вторично.

Ключевые слова: дети, воронкообразная деформация, грудина, рентгеноспектральный микроанализ.

Для цитирования: Шамик В.Б. Рентгеноспектральный микроанализ грудины при воронкообразных деформациях грудной клетки. *Казанский мед. ж.* 2019; 100 (5): 757–761. DOI: 10.17816/KMJ2019-757.

X-ray spectral microanalysis of the sternum in patients with congenital pectus excavatum

V.B. Shamik

Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract

Aim. To study the mineral composition of the sternum in patients with congenital funnel-shaped deformations of the chest.

Methods. X-ray spectral microanalysis of the sternum was performed in 10 patients with pectus excavatum aged 14–17 years (30 zones) on a scanning electron microscope with an accelerating voltage of 25 kV. The results of the sternum examination of 3 patients aged 14–16 years (10 zones) operated on for other diseases were used as the control.

Results. Graphic images of mineralization of each investigated zone of the sternum were obtained. As a result of processing the graphic data, the IBAS-200 system obtained average atomic orbital values, weight and atomic percent, net and background intensities and their ratios, intensity errors of the elements-constituents of mineral matrix of the sternum. The structures of the sternum in the main and control groups did not differ. The predominant elements are oxygen (O), phosphorus (P) and calcium (Ca). Their net intensity in patients and in healthy subjects

of the corresponding age was 101.16 ± 2.78 and 99.23 ± 1.97 ($p < 0.001$), respectively; 402.38 ± 2.23 and 421.28 ± 1.99 ($p < 0.001$); 586.41 ± 2.37 and 601.32 ± 1.99 ($p < 0.001$). Net intensity of phosphorus and calcium in healthy children was higher by 2.5–4.5%, and that of oxygen was lower by 1.9%. An important indicator is the ratio of the net and background intensities of the elements.

Conclusion. Net intensity of phosphorus and calcium in healthy children was higher, in the pathogenesis of the deformation of the chest, the sternum changes its shape secondarily.

Keywords: children, pectus excavatum, sternum, X-ray spectral microanalysis.

For citation: Shamik V.B. X-ray spectral microanalysis of the sternum in patients with congenital pectus excavatum. *Kazan medical journal.* 100 (5): 757–761. DOI: 10.17816/KMJ2019-757.

Процесс минерализации костной ткани включает значительное количество взаимосвязанных между собой факторов и механизмов, которые можно условно разделить на три основные группы [1]:

а) локальное увеличение содержания ионов кальция и фосфатных ионов до уровня, при котором могла бы произойти спонтанная преципитация минералов;

б) наличие веществ, обеспечивающих сайты для формирования ядер минералов;

в) наличие веществ, препятствующих образованию минералов и их удалению или инактивации для последующего обызвествления.

Главную роль в процессе минерализации кости играют матриксные пузырьки межклеточного вещества. Мембраны этих пузырьков создают особую закрытую среду для аккумуляции ионов кальция и фосфора, которые первоначально превращаются в аморфные фосфаты кальция, а затем в апатиты. Минералы занимают около 35% объёма кости [2]. Почти все минеральные вещества в пластинчатой кости концентрируются внутри коллагеновых фибрилл [3]. Объём минеральных веществ вне фибрилл составляет всего 5–10% [4].

При различных аномалиях развития скелета и диспластических состояниях соединительной ткани происходит нарушение минерализации костной ткани [5]. Предположительно это явление возможно и при врождённой воронкообразной деформации грудной клетки.

Кроме того, при воронкообразной грудной клетке деформации подвержены в той или иной степени и рёбра, и грудина. Существуют различные мнения о влиянии грудины на формирование воронкообразной деформации: одни авторы считают, что деформация грудины — вторичное следствие непропорционального ускоренного роста рёберных хрящей [6–9], другие указывают на участие грудины в формировании деформации за счёт нарушения её эндохондрального роста [10, 11].

Целью настоящего исследования было изучение минерального состава грудины у па-

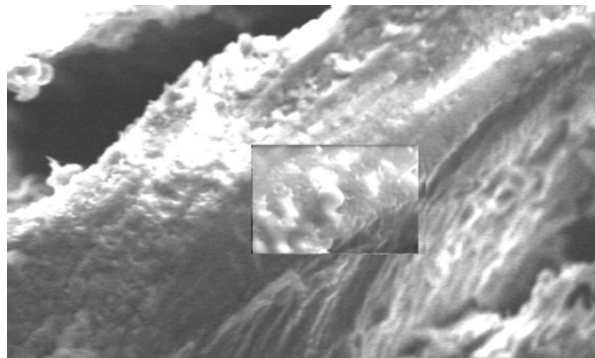


Рис. 1. Зона исследования с помощью рентгеноспектрального микроанализа грудины у пациента с воронкообразной деформацией грудной клетки

циентов с врождёнными воронкообразными деформациями грудной клетки и влияния грудины на формирование деформации грудной клетки.

Выполнен рентгеноспектральный микроанализ (РСМ) резецированных во время хирургического вмешательства фрагментов тела грудины у 10 больных, оперированных по поводу воронкообразной деформации грудной клетки, в возрасте от 14 до 17 лет (рис. 1). РСМ грудины служит научным исследованием, в стандарт обследования больных с деформациями грудной клетки не входит.

Контролем служили результаты РСМ фрагментов грудины 3 пациентов 14–16 лет, полученных во время операционного доступа с использованием стернотомии. Этим больным оперировали по поводу заболеваний, не связанных с патологией опорно-двигательного аппарата (пациенты страдали заболеваниями сердца). Были взяты небольшие фрагменты грудины объёмом несколько миллиметров, не влияющие на процесс сращения грудины в послеоперационном периоде.

В основной и контрольной группах исследования проведены в соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации и одобрены локальным независимым этическим комитетом ФГБОУ ВО «Ростовский го-

Таблица 1. Результаты обработки графических данных одной зоны исследуемого объекта с помощью системы IBAS-200 (пациент К. 15 лет)

D:\DX4\EDS\USR\BONES\KURASH1.SPC Current Time: 18:10:11 Date : 15-Feb- 7	kV: 25.00 Tilt: 0.00 Take-off: 35.77 Tc: 40 Det Type: UTW, Sapphire Res: 138.21 Lsec: 168
Element Wt % At % O 53.55 70.71 Na 4.13 3.80 Mg 0.55 0.48 Si 0.53 0.40 P 18.26 12.46 S 0.33 0.22 Cl 0.07 0.04 K 0.30 0.16 Ca 22.26 11.73 Total 100.00 100.00	Element Net Inten. Backgrd Int. Error P/B O 81.83 1.63 0.86 50.11 Na 28.78 14.71 1.77 1.96 Mg 6.09 20.64 6.55 0.29 Si 10.62 24.93 4.33 0.43 P 392.44 23.45 0.40 16.74 S 6.34 21.31 6.40 0.30 Cl 1.51 18.84 22.96 0.08 K 6.64 15.77 5.49 0.42 Ca 464.26 13.81 0.36 33.61

Примечание: Wt % — весовой процент; At % — атомарный процент; Net Inten. — весовая интенсивность; Backgrd — фон; Int. Error — ошибка интенсивности; P/B — отношение весовой и фоновой интенсивности; Sapphire Res — величина разрешения; kV — величина напряжения; Element — обозначение химических элементов согласно таблице Д.И. Менделеева.

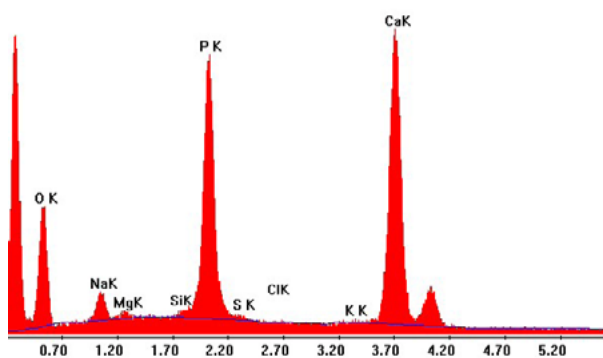


Рис. 2. Графическое изображение минерализации грудины при воронкообразной деформации грудной клетки

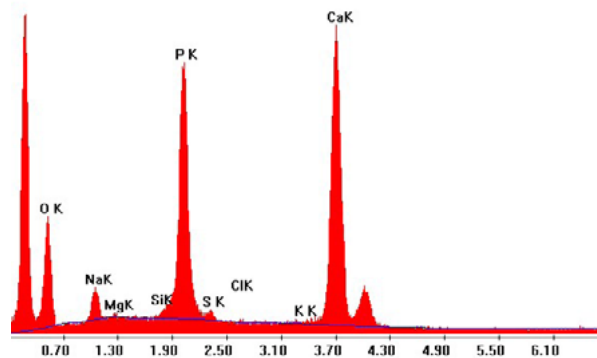


Рис. 3. Графическое изображение минерализации грудины в норме

сударственный медицинский университет» Минздрава России. Все пациенты, которых госпитализируют в университетскую клинику, подписывают согласие на участие в клинических исследованиях, организованных на её базе.

Исследуемых зон грудины у больных детей было 30, в контрольной группе — 10.

Исследования выполнены на сканирующем электронном микроскопе XL-30 (Philips). Образцы фиксировали в 2,5% глutarовом альдегиде на фосфатном буфере (pH=7,2), промывали, проводили через спирты восходящей концентрации и ацетон, высушивали в сушке критической точки. Образцы монтировали на алюминиевые столики с помощью адгезивных проводящих прокладок, из углеродного цемента создавали мостики на столик для предотвращения накопления заряда на образцах. Затем напыляли углерод.

Для РСМ использовали ускоряющее напряжение 25 кВ. Анализ проводили на детекторе

EDAX с Li/Be ультратонким окном. Морфометрические исследования осуществляли с помощью системы обработки графических данных IBAS-200. РСМ выполнялся на базе Ростовского областного патологоанатомического бюро (главный врач — к.м.н. Г.А. Резникова).

Приводим пример результатов обработки одной зоны фрагмента грудины у больного К. 15 лет с воронкообразной деформацией грудной клетки (табл. 1).

Получены также графические изображения минерализации каждой исследуемой зоны. Приводим примеры зоны РСМ у пациента с воронкообразной деформацией грудной клетки (больной К. 15 лет, рис. 2) и наблюдения контрольной группы (исследуемая Г. 16 лет, рис. 3).

Результаты обработки графических данных системой IBAS-200 30 зон грудины больных детей и 10 зон в контрольной группе сведены в таблицы (табл. 2, 3) с выведением средних

Таблица 2. Показатели минерализации костной ткани грудины у пациентов с воронкообразной деформацией грудной клетки ($M\pm m$) на основании данных рентгеноспектрального микроанализа* ($n=30$)

Element	Wt %	At %	Net Inten.	Backgrd	Int. Error	P/B
O	56,01±3,47	73,17±4,78	101,16±2,78	7,49±1,86	1,64±0,02	13,50±1,49
Na	3,33±0,21	3,03±0,87	26,73±1,96	18,23±1,87	3,99±1,07	1,47±1,05
Mg	0,08±0,023	0,07±0,023	0,99±0,035	22,84±1,09	78,66±3,78	0,04±0,032
Si	0,49±0,06	0,37±0,23	11,62±1,47	23,95±1,54	8,17±0,97	0,49±0,95
P	15,75±1,98	10,63±0,12	402,38±2,23	23,24±1,96	0,82 ±0,034	17,31±1,14
S	0,35±0,032	0,23±0,034	8,30±1,21	22,00±1,53	10,55±1,23	0,38±0,79
Cl	0,09±0,012	0,05±0,003	2,18±0,67	18,03±1,98	32,85±1,23	0,12±0,34
K	0,42±0,12	0,23±0,056	11,24±1,03	14,96±2,39	7,25±1,47	0,75±0,43
Ca	23,47±1,17	12,24±0,32	586,41±2,37	13,42±1,32	0,66±0,023	43,70±1,79

Примечание: *достоверность различий между показателями ($p < 0,01$); Wt % — весовой процент; At % — атомарный процент; Net Inten. — весовая интенсивность; Backgrd — фон; Int. Error — ошибка интенсивности; P/B — отношение весовой и фоновой интенсивности; Element — обозначение химических элементов согласно таблице Д.И. Менделеева.

Таблица 3. Показатели минерализации костной ткани грудины у здоровых детей ($M\pm m$) на основании данных рентгеноспектрального микроанализа* ($n=10$)

Element	Wt %	At %	Net Inte.	Backgrd	Int. Error	P/B
O	58,09±2,14	69,32±2,18	99,23±1,97	6,54±0,96	1,32±0,04	15,17±2,05
Na	3,12±0,34	2,97±0,72	27,13±1,32	19,56±1,51	3,13±0,78	1,38±0,87
Mg	0,09±0,029	0,06±0,019	0,87±0,029	24,67±1,23	67,59±4,18	0,035±0,023
Si	0,54±0,09	0,35±0,13	12,11±1,32	25,19±1,39	9,59±0,86	0,48±0,949
P	17,31±1,23	12,17±0,22	421,28±1,99	17,98±1,34	0,62±0,079	23,43±1,485
S	0,39±0,024	0,31±0,022	7,43±1,11	21,24±1,29	11,15±1,67	0,349±0,86
Cl	0,09±0,023	0,06±0,002	2,56±0,39	16,05±1,35	30,11±1,69	0,159±0,28
K	0,34±0,41	0,19±0,067	10,34±1,19	15,16±1,79	8,02±1,12	0,68±0,66
Ca	25,17±1,32	13,15±0,28	601,32±1,99	14,12±1,78	0,79±0,012	42,58±1,117

Примечание: *достоверность различий между показателями ($p < 0,01$); Wt % — весовой процент; At % — атомарный процент; Net Inten. — весовая интенсивность; Backgrd — фон; Int. Error — ошибка интенсивности; P/B — отношение весовой и фоновой интенсивности; Element — обозначение химических элементов согласно таблице Д.И. Менделеева.

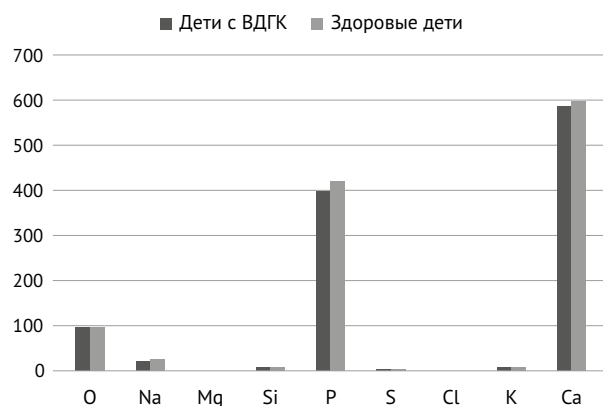


Рис. 4. Сравнение минерализации грудины в норме и при воронкообразной деформации грудной клетки в виде диаграммы. Элементы обозначены согласно таблице химических элементов Д.И. Менделеева; ВДГК — воронкообразная деформация грудной клетки

показателей ($M\pm m$) представленных выше параметров.

Анализируя полученные цифровые и графические данные степени минерализации костной ткани грудины у детей с воронкообразной деформацией грудной клетки и сравнивая их с таковыми у здоровых детей (см. рис. 2 и 3; табл. 2 и 3), мы пришли к выводу, что элементная качественная и количественная структура грудины у основной и контрольной групп практически не различается. Преобладают кислород (O), фосфор (P) и кальций (Ca). Их весовая интенсивность у больных и здоровых детей соответствующего возраста составила соответственно: 101,16±2,78 и 99,23±1,97 ($p < 0,001$); 402,38±2,23 и 421,28±1,99 ($p < 0,001$); 586,41±2,37 и 601,32±1,99 ($p < 0,001$).

Важным показателем считаем соотношение весовой и фоновой интенсивности элементов [12].

Графическое сравнение этих показателей (рис. 4) позволило получить столбцы, соответствующие по высоте друг другу со статистически незначительными количественными отклонениями.

ВЫВОД

1. На основании проведённых исследований с помощью сканирующей электронной микроскопии грудины с рентгеноспектральным микроанализом элементного состава у детей с воронкообразной деформацией грудной клетки можно достоверно утверждать, что весовая интенсивность фосфора и кальция у здоровых детей выше на 2,5–4,5%, а кислорода — ниже на 1,9%.

2. В патогенезе возникновения врождённой деформации грудной клетки грудина меняет свою форму вторично вследствие непропорционального ускоренного роста рёберных хрящей.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов по представленной статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson H.C. Matrix vesicle calcification. *Introduction. Fed. Proc.* 1976; 35: 105–108. DOI: 10.1016/b978-0-12-119204-4.50011-9.
2. Лаврищева Г.И., Оноприенко Г.А. Морфологические и клинические аспекты репаративной регенерации опорных органов и тканей. М.: Медицина. 1996; 208 с. [Lavrishcheva G.I., Onoprienko G.A. *Morfologicheskie i klinicheskie aspekty reparativnoy regeneratsii opornykh organov i tkaney.* (Morphological and clinical aspects of reparative regeneration of supporting organs and tissues.) Moscow: Meditsina. 1996; 208 p. (In Russ.)]
3. Glimcher M.J. Composition, structure and organization of bone and other mineralized tissues and the mechanism of calcification. In: *Handbook of physiology-endocrinology VII.* Ed. G.D. Aurbach. Baltimore: Williams and Wilkins. 1976; 25–116. DOI: 10.1136/bmj.2.6038.761-a.
4. Boyde A. Scanning electron microscope studies of bone. In: *The biochemistry and physiology of bone.* Ed. G.H. Bourne. 2nd edn. New York: Academic. 1972; 1: 259–310. DOI: 10.1016/c2013-0-12533-0.
5. Ревелл П.А. *Патология кости.* Пер. с англ. М.: Медицина. 1993; 368 с. [Revell P. A. *pathology of bone.* Berlin, Springer-Verlag, 1986; 30 p. Russ. Ed.: *Patologiya kosti.* Moscow: Meditsina. 1993; 368 p. (In Russ.)]
6. Bentz M.L., Futrell J.W. Improved chest wall fixation for correction of pectus excavatum. *British J. Plastic Surg.* 1992; 45 (5): 367–370. DOI: 10.1016/0007-1226(92)90006-j.
7. Дольницкий О.В., Дирдовская Л.Н. *Врождённые деформации грудной клетки у детей.* К.: Здоровье. 1978; 117 с. [Dol'nitskiy O.V., Dirdivskaya L.N. *Vrozhdennyye deformatsii grudnoy kletki u detey.* (Congenital chest deformities in children.) Kiev: Zdorov'e. 1978; 117 p. (In Russ.)]
8. Raichura N., Entwisle J., Leverment J., Beardsmore C.S. Breath-hold MRI in evaluating patients with pectus excavatum. *Br. J. Radiol.* 2001; 74: 701–708. DOI: 10.1259/bjr.74.884.740701.
9. Sadler T.W. Embryology of the sternum. *Chest Surg. Clin. N. Amer.* 2000; 10 (2): 237–244.
10. Баиров Г.А., Фокин А.А. Килевидная деформация грудной клетки. *Вестн. хир.* 1983; (2): 89–94. [Baиров G.A., Fokin A.A. *Keeled chest deformation.* *Vestnik khirurgii.* 1983; (2): 89–94. (In Russ.)]
11. Haje S.A., Harcke H.T., Bowen J.R. Growth disturbance of the sternum and pectus deformities: imaging studies and clinical correlation. *Pediatr. Radiol.* 1999; 29 (5): 334–341. DOI: 10.1007/s002470050602.
12. *Физические основы рентгеноспектрального микроанализа.* СПб.: ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» при ФТИ им. А.Ф. Иоффе. 2010; 27 с. [Fizicheskie osnovy rentgenospektral'nogo mikroanaliza. (Physical basis of X-ray microanalysis.) Saint Petersburg: “Materials Science and Diagnostics in Advanced” at the Institute of Physics and Technology named after A.F. Ioffe. 2010; 27 p. (In Russ.)]