

Количественная характеристика тканей позвонков у эмбрионов и плодов человека

С.Л. Кабак, В.В. Заточная, Д.М. Гордионюк

Учреждение образования Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

Введение. Публикации, посвященные динамике роста хрящевых закладок позвонков в эмбриогенезе, немногочисленны. В них, как правило, содержатся сведения только о некоторых общих тенденциях изменения соотношения между отделами позвоночного столба и динамике роста размеров тел закладок отдельных его сегментов.

Цель работы – установить закономерности роста линейных размеров и объема закладки тела позвонков различной локализации, ее хрящевого и костного компонентов, у эмбрионов и плодов человека в первом триместре беременности.

Материалы и методы. Измерение морфометрических параметров тел закладок позвонков (высота, поперечный и переднезадний размер, максимальная площадь поперечного сечения тела/центра окостенения) проводилось на тотально окрашенных и просветленных препаратах, гистологических срезах фрагментов позвоночного столба, а также на серийных срезах цельных эмбрионов и плодов человека 6–20-недельного возраста, окрашенных гематоксилином и эозином.

Результаты. У зародышей человека в эмбриональном и раннем плодном периодах развития грудной отдел самый протяженный, а крестцовый отдел самый короткий. При этом наибольшие линейные размеры и объем имеют тела закладок поясничных позвонков. Во всех отделах позвоночного столба среднее значение поперечного размера превышало высоту и переднезадний размер тела. С возрастом увеличение высоты, поперечного и переднезаднего размеров тела закладки позвонков во всех отделах позвоночного столба носит линейный характер, а увеличение объема тела закладок позвонков более точно описывается степенной функцией.

Заключение. Различия морфометрических параметров тел позвонков разной локализации детерминированы генетически и выявляются уже в раннем плодном периоде развития. При этом наибольшие линейные размеры и объем имеют тела закладок поясничных позвонков. Во всех отделах позвоночного столба среднее значение поперечного размера превышает высоту и переднезадний размер тела. В раннем плодном периоде развития наибольшие средние линейные размеры и объем имеют центры окостенения, расположенные в закладках поясничных и грудных позвонков, так как с них начинается процесс окостенения хрящевых закладок.

Ключевые слова: эмбрион, плод человека, тело позвонка, морфометрия, окостенение

Для корреспонденции: Валентина Владимировна Заточная. E-mail: v.zatochnaya@ Rambler.ru

Для цитирования: Кабак С.Л., Заточная В.В., Гордионюк Д.М. Количественная характеристика тканей позвонков у эмбрионов и плодов человека. Клин. эксп. морфология. 2020;9(1):49–56. DOI:10.31088/CEM2020.9.1.49-56

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 19.12.2019. **Получена после рецензирования** 21.01.2020. **Принята в печать** 11.02.2020.

Quantitative characteristic of vertebral tissues in human embryos and fetuses

S.L. Kabak, V.V. Zatochnaya, D.M. Gordionok

Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus

There are very few publications on the dynamics of growth of cartilage models of the vertebrae in human embryos and fetuses. They usually deal with general trends in the change of the ratio between the spine regions and the dynamics of growth in the size of the vertebral bodies. The aim of the study was to reveal the patterns of the increase in linear dimensions and volume of the vertebrae of various localization, its cartilage and bone components in human embryos and fetuses during the first trimester of pregnancy.

Materials and methods. Whole-mount skeletal preparations stained with alcian blue and alizarin red as well as serial histological sections of spine fragments stained with hematoxylin and eosin were studied. A total of 48 human embryos/fetuses from 6 to 20 weeks of age were used. Morphometric analysis of vertebral bodies (height, transverse and anteroposterior size, maximum cross-sectional area of vertebral bodies and ossification center) was performed.

Results. In the embryonic and the early fetal periods of prenatal development, the thoracic spine is the longest region in human embryos, the sacral spine, the shortest. At the same time, lumbar vertebral body anlagen have the largest linear dimensions and volume. In all regions of the spine, the average transverse size exceeded the height and the anteroposterior size of the vertebral body. The linear increase in height, transverse and anterior dimensions of the vertebral body anlagen in all spine regions was detected with age. On the contrary, the volume increase is more accurately described by a power function.

Conclusion. Differences in morphometric parameters of vertebral bodies of different localization are determined genetically and are manifested in the early fetal period of prenatal development wherein the lumbar vertebral body anlagen have the largest linear dimensions and volume. In all parts of the vertebral column, the average transverse size exceeds the height and anteroposterior size of the vertebral body anlage. In the early fetal period, the ossification centers located in the lumbar and thoracic vertebral bodies show the largest average linear dimensions and volume.

Keywords: embryo, human fetus, vertebral body, morphometry, ossification

Corresponding author: Valentina V. Zatochnaya. E-mail: v.zatochnaya@rambler.ru

For citation: Kabak S.L., Zatochnaya V.V., Gordionok D.M. Quantitative characteristic of vertebral tissues in human embryos and fetuses. Clin. exp. morphology. 2020;9(1):49–56. (In Russ.). DOI:10.31088/CEM2020.9.1.49-56.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Received 19.12.2019. **Received in revised form** 21.01.2020. **Accepted** 11.02.2020.

В пренатальном онтогенезе развитие позвонков начинается с появления у 5-недельных эмбрионов человека (10 мм теменно-копчиковой длины, ТКД) мезенхимных конденсаций вокруг хорды. У плодов 9-недельного возраста закладки позвонков полностью хрящевые, а начиная с 10–11-й недели внутриутробного развития (плоды 45–60 мм ТКД) в них выявляются три центра оксификации – в области тела и в двух половинах нейральной дуги [1]. С 12-й недели эти центры визуализируются с помощью ультразвукового исследования с высокой разрешающей способностью, а также методами компьютерной и магнитно-резонансной томографии. Данные о линейных размерах центров оксификации тел позвонков разных отделов позвоночного столба плодов человека в горизонтальной и парасагитальной проекциях достаточно полно представлены в литературе [2–4]. Тем не менее о реальных размерах закладок тел позвонков, состоящих одновременно из хрящевой и костной части, по этим данным можно судить только опосредованно. Публикации, посвященные динамике роста хрящевых закладок позвонков в эмбриогенезе, немногочисленны. В них, как правило, содержатся сведения только о некоторых общих тенденциях изменения соотношения между отделами позвоночного столба и динамике роста размеров тел закладок отдельных его сегментов [1, 5, 6].

Цель работы – установить закономерности роста линейных размеров и объема закладки тела позвонков разной локализации, ее хрящевой и костной компонент, у эмбрионов и плодов человека в первом триместре беременности.

Материалы и методы

Изучено 46 неидентифицируемых по полу целых зародышей человека и их фрагментов 6–20-й недели гестации. Часть материала была получена в городской гинекологической больнице Минска в ходе искусственного прерывания беременности. После фиксации в 96% спирте и обезвоживания в ацетоне зародыши totally окрашивали ализариновым красным и ализариновым синим, а затем просветляли в 10% растворе КОН. Фрагменты плодов человека использовались для приготовления гистологических срезов в поперечной плоскости, окрашенных гематоксилином и эозином. Был также проведен анализ гистологических срезов зародышей, ранжированных по 23 стадиям развития из эмбриологической коллекции Карнеги (доступ получен через Digitally Reproduced Embryonic Morphology (DREM) project) и эмбриологической коллекции Белорусского государственного медицинского университета (диапазон ТКД – от 11 до 87 мм). Весь материал объединили в две возрастные группы: 6–10-недельные эмбрионы и плоды (на 10-й неделе эмбриогенеза появляются участки кальцификации в центре закладки тела двух нижних грудных и верхнего поясничного позвонков) и плоды 11–20-й недели внутриутробного развития.

На просветленных препаратах и гистологических срезах под стереомикроскопом Leica MS 5 (Leica Microsystems, Германия) с использованием программного обеспечения для обработки и анализа изображений Leica Application Suite V 3.80.0 измеряли следующие параметры хрящевой и костной части закладки (рис. 1): высота (мм) – расстояние между верхним

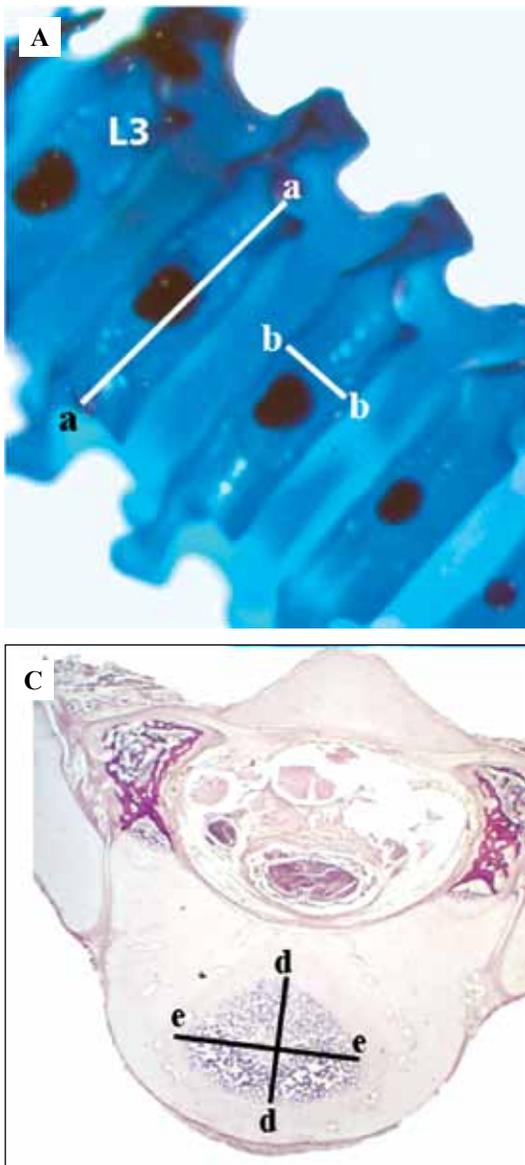


Рис. 1. Морфометрические параметры: aa – поперечный размер тела, bb – высота тела, cc – переднезадний размер тела, dd – переднезадний размер центра оксификации, ee – поперечный размер центра оксификации.

A – поясничные позвонки 11-недельного зародыша человека. Просветленный препарат. Окраска ализириновым красным и альтиановым синим, $\times 10$.

B – поперечный срез Th7 зародыша человека 23 стадии развития Карнеги. Гистологический препарат. Окраска гематоксилином и эозином, $\times 80$

C – поперечный срез L4 20-недельного зародыша человека. Гистологический препарат. Окраска гематоксилином и эозином, $\times 12,5$

Fig. 1. Morphometric parameters: aa – transverse body size, bb – body height, cc – anteroposterior body size, dd – anteroposterior size of the ossification center, ee – transverse size of the ossification center.

A – lumbar vertebrae of an 11-week-old human fetus. Whole-mount. Alizarin Red/Alcian Blue stain, $\times 10$.

B – cross section of Th7 human embryo of 23 Carnegie stage. Histology slide. H&E stain, $\times 80$.

C – cross section of L4 20-week-old human embryo. Histology slide. H&E stain, $\times 12,5$

и нижним краем тела/центра окостенения; поперечный размер (мм) – расстояние между боковыми краями тела/центра окостенения; переднезадний размер (мм) – расстояние между передним и задним краем тела/центра окостенения; максимальная площадь поперечного сечения тела/центра окостенения (мм^2). Объем тела позвонка/центра окостенения (мм^3) рассчитывали по формуле: максимальная площадь поперечного сечения \times высоту. В последующем анализировали средние значения перечисленных выше параметров для каждого отдела позвоночного столба. Статистический анализ полученных данных проводили в программе Statistica 10.0. Данные представлены в виде $M \pm SD$ (при параметрическом характере распределения переменных величин), или медианы и интерквартильного размаха ($Me [Q25; Q75]$), минимального и максимального значения (при непараметрическом характере распределения переменных величин). Достоверность различий оценивали по t-критерию Стьюдента и U-критерию Манна–Уитни.

Результаты считали значимыми при вероятности 95,5% ($p < 0,05$).

Корреляцию между морфометрическими параметрами и возрастом зародышей анализировали методом наименьших квадратов в программе Excel 2011.

Результаты

Отделы позвоночного столба имеют разную протяженность (табл. 1). У зародышей человека в эмбриональном и раннем плодном периодах развития грудной отдел самый протяженный, крестцовый – самый короткий. Грудной отдел длиннее поясничного почти в 1,5 раза в первой возрастной группе и в 2 раза во второй возрастной группе. У зародышей 6–10-недельного возраста шейный отдел длиннее поясничного ($p = 0,0155$). У 11–20-недельных плодов разница этих двух параметров была не столь значительной, но статистически достоверной ($p = 0,046$). У всех зародышей поясничный отдел позвоночника длиннее крестцового.

Данные о морфометрических параметрах тела закладки позвонков разной локализации по двум возрастным группам представлены в таблице 2. Самая большая средняя высота характерна для тела закладок

поясничных позвонков. Этот показатель статистически достоверно больше в сравнении с закладками шейных, грудных и крестцовых позвонков зародышей 11–20-недельного возраста.

Таблица 1 / Table 1

Протяженность шейного, грудного, поясничного и крестцового отделов позвоночного столба у 6–20-недельных зародышей человека

The length of the cervical, thoracic, lumbar and sacral spine regions in 6–20-week-old human embryos

Возраст (неделя) Age (weeks)	n	Протяженность отделов позвоночного столба (мм) Spine regions length (mm)							
		C2–C7 Me (Q25; Q75), мм	Max-min, мм	Th1–Th12 Me (Q25; Q75), мм	Max-min, мм	L1–L5 Me (Q25; Q75), мм	Max-min, мм	S1–S5 Me (Q25; Q75), мм	Max-min, мм
6–10	26	4,19 (2,72; 4,87)	6,25–1,70	5,73 (4,13; 6,49)	11,63– 3,10	3,70 (2,15; 4,12)	6,43– 1,60	1,59 (1,44; 1,99)	3,54– 1,07
11–20	20	13,97 (11,58; 20,48)	24,93– 7,93	30,60 (25,48; 39,30)	46,81– 14,81	14,72 (11,69; 20,90)	25,69– 7,46	10,92 (8,93; 18,54)	22,42– 4,42

n – число зародышей; C2–C7 – шейные позвонки; Th1–Th12 – грудные позвонки; L1–L5 – поясничные позвонки; S1–S5 – крестцовые позвонки

n – number of embryos; C2–C7 – cervical vertebrae; Th1–Th12 – thoracic vertebrae; L1–L5 – lumbar vertebrae; S1–S5 – sacral vertebrae

Таблица 2 / Table 2

Размеры тел позвонков у 6–20-недельных зародышей человека

Vertebral body size in 6–20-week-old human embryos

Отдел позвоночника Spine region	6–10 недель 6–10 weeks		11–20 недель 11–20 weeks			
	n	M±SD, мм	n	M±SD, мм		
Высота/Height						
Шейный/Cervical	156	0,51±0,18	120	1,93±0,61		
Грудной/Thoracic	312	0,47±0,18	240	1,98 ±0,61*		
Поясничный/Lumbar	130	0,51±0,22	100	2,26±0,67◇		
Крестцовый/Sacral	130	0,28±0,12●	100	1,63±0,58●		
Поперечный размер/Cross size						
	n	Me (Q25; Q75), мм	Max-min, мм	n	Me (Q25; Q75), мм	Max-min, мм
Шейный/Cervical	156	1,08 (1,01; 1,51)	1,86–0,74	120	3,16 (2,14; 6,01)	6,86–1,91
Грудной/Thoracic	312	1,15 (1,01; 1,54)	2,07–0,77	240	4,17(2,85; 6,19)*	8,4–2,13
Поясничный/Lumbar	130	1,06 (0,95; 1,31) ◇	1,89–0,39	100	4,08 (2,49; 5,54)	7,52–1,43
Крестцовый/Sacral	130	0,69 (0,54; 0,91)●	1,31–0,14	100	3,19 (1,55; 4,72)●	6,1–0,91
Переднезадний размер/Anteroposterior size						
	n	Me (Q25; Q75), мм	Max-Min, мм	n	Me (Q25; Q75), мм	Max-min, мм
Шейный/Cervical	156	0,59 (0,43; 0,62)	0,87–0,24	120	2,32 (1,25; 3,12)	4,01–0,71
Грудной/Thoracic	312	0,54 (0,43; 0,62)	0,98–0,31	240	2,49(1,49; 3,31)*	4,38–0,7
Поясничный/Lumbar	130	0,58 (0,44; 0,67)◇	1,08–0,24	100	2,76 (1,52; 3,39) ◇	4,41–0,89
Крестцовый/Sacral	130	0,32 (0,21; 0,43)●	0,69–0,08	100	1,83 (0,99; 2,52)●	3,99–0,45

n – число позвонков; * – различия между закладками грудных и шейных позвонков статистически достоверны; ◇ – различия между закладками поясничных и грудных позвонков статистически достоверны; ● – различия между закладками крестцовых и поясничных позвонков статистически достоверны

n – number of vertebrae; * – differences between thoracic and cervical vertebral body anlagen are statistically significant; ◇ – differences between lumbar and thoracic vertebral body anlagen are statistically significant; ● – differences between sacral and lumbar vertebral body anlagen are statistically significant

Средний поперечный размер тела закладки позвонков в 1,5–2 раза больше его высоты. Самый большой показатель в обеих возрастных группах имеется у тела закладки грудных позвонков. У зародышей 11–20-недельного возраста различия среднего поперечного размера тела грудных и поясничных позвонков были статистически недостоверными.

Средний переднезадний размер тела закладок поясничных позвонков был статистически достоверно больше по сравнению с грудными и крестцовыми позвонками, а в возрастной группе 11–20-недельных плодов и относительно шейных позвонков. Во всех отделах позвоночного столба среднее значение переднезаднего размера превышало высоту тела, но было меньше, чем поперечный размер.

В таблице 3 представлены данные о морфометрических параметрах центров оссификации в закладке тел позвонков. Наибольшие средние линейные размеры и объем имели центры окостенения, расположенные

в хрящевых закладках поясничных и грудных позвонков. У плодов человека в возрастном интервале 11–20 недель гестации объем костной ткани в закладках тела шейных, грудных и поясничных позвонков составляет 13–14%. Вместе с тем в закладке тела поясничных позвонков площадь центра оссификации занимала 38% площади ее поперечного сечения, что статистически достоверно больше по сравнению с шейными и крестцовыми позвонками.

В проанализированной выборке с использованием регрессионного анализа установлено, что с возрастом увеличение высоты, поперечного и переднезаднего размеров тела закладок позвонков во всех отделах позвоночного столба носит линейный характер, а увеличение объема тела закладок позвонков более точно, учитывая значение коэффициента корреляции, описывается с помощью степенной функции. На графиках (рис. 2) это проиллюстрировано на примере тела закладок поясничных позвонков.

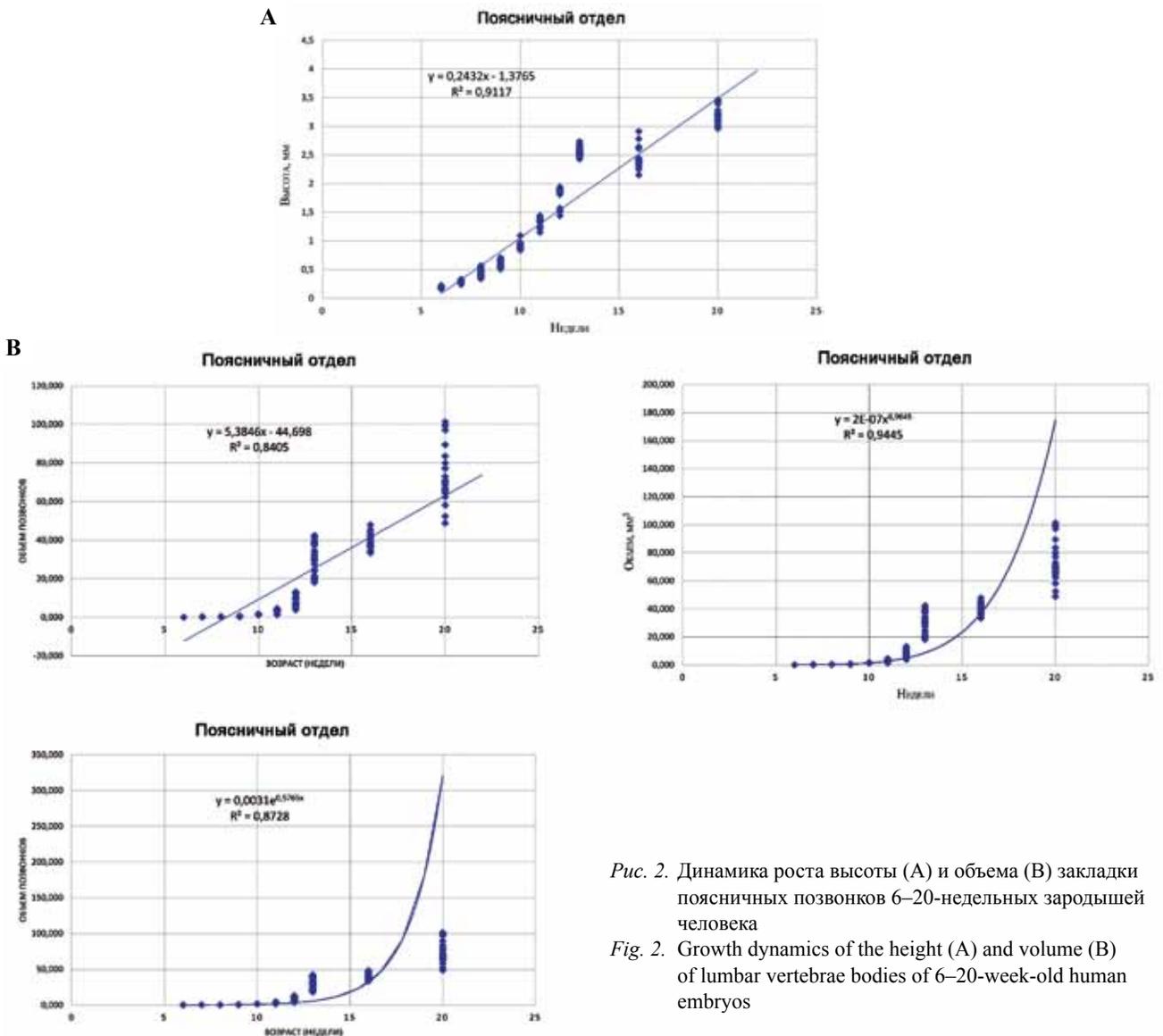


Рис. 2. Динамика роста высоты (А) и объема (В) закладки поясничных позвонков 6–20-недельных зародышей человека

Fig. 2. Growth dynamics of the height (A) and volume (B) of lumbar vertebrae bodies of 6–20-week-old human embryos

**Морфометрические параметры центра окостенения (ЦО) в закладке тела позвонков
11–20-недельных зародышей человека**

Morphometric parameters of the ossification centers (OS) in the vertebral body primordia of 11–20-week old human embryos

Морфометрический параметр / Morphometric indicator	Отделы позвоночного столба (мм) / Spine regions (mm)							
	C2–C7 Me (Q25; Q75), мм	Max- min, мм	Th1–Th12 Me (Q25; Q75), мм	Max- min, мм	L1–L5 Me (Q25; Q75), мм	Max- min, мм	S1–S5 Me (Q25; Q75), мм	Max- min, мм
Высота ЦО/ OS height	0,79 (0,51; 1,42)	1,64– 0,32	0,83 (0,62; 1,43)*	1,69– 0,22	0,87 (0,74; 1,42)	1,69– 0,32	0,72 (0,57; 1,2)●	1,42– 0,12
Поперечный размер ЦО/ OS cross size	1,22 (0,82; 1,73)	2,66– 0,75	1,37 (0,99; 2,17)*	3,53– 0,47	1,62 (1,26; 2,43)◇	2,78– 0,33	0,87 (0,62; 1,08)●	2,09– 0,11
Переднезадний размер ЦО/ OS anteroposterior size	0,82 (0,57; 1,4)	2,12– 0,41	1,31 (0,81; 1,88)*	3,32– 0,32	1,49 (1,05; 1,83)◇	2,92– 0,42	0,78 (0,52; 1,02)●	1,59– 0,13
Объем ЦО/ OS volume	1,22 (0,5; 3,09)	8,87– 0,08	3,96 (0,57; 5,61)*	14,31– 0,21	5,06 (1; 6,8)◇	14,49– 0,09	0,65 (0,18; 1,44)●	4,82– 0,02
S_1/S_2	0,21 (5,61/26,71)		0,34 (10,69/31,33)		0,38 (11,22/29,25)		0,23 (4,85/20,59)	
V_1/V_2	0,13 (8,87/68,9)		0,14 (14,31/101,22)		0,14 (14,49/104,02)		0,08 (4,82/58,15)	
n	96		216		103		80	

n – число измеренных закладок позвонков; S_1 – максимальная площадь поперечного сечения центра окостенения; S_2 – максимальная площадь поперечного сечения закладки тела позвонка; V_1 – максимальный объем центра окостенения; V_2 – максимальный объем закладки тела позвонка

* – различия между ЦО в закладках грудных и шейных позвонков статистически достоверны; ◇ – различия между ЦО в закладках поясничных и грудных позвонков статистически достоверны; ● – различия между ЦО в закладках крестцовых и поясничных позвонков статистически достоверны

n – number of measured vertebral body anlagen; S_1 – maximal ossification center cross-sectional area; S_2 – maximal vertebral body anlage cross-sectional area; V_1 – maximal ossification center volume; V_2 – maximal vertebral body anlage volume

* – differences between thoracic and cervical vertebral ossification center are statistically significant; ◇ – differences between lumbar and thoracic vertebral ossification center are statistically significant; ● – differences between sacral and lumbar vertebral ossification center are statistically significant

Обсуждение

У 6–10-недельных зародышей человека тело закладок позвонков полностью состоит из хрящевой ткани. При этом грудной отдел позвоночника является самым протяженным, а крестцовый самым коротким. Наши данные о процентном соотношении шейного, грудного, поясничного и крестцового отделов совпадают с результатами, ранее представленными G.W. Friedland и P. de Vries [5], а также R. O’Rahilly et al. [6].

Нами установлено, что в обеих возрастных группах грудной и шейный отделы позвоночного столба длиннее поясничного, хотя у 11–20-недельных плодов различие протяженности шейного и поясничного отделов не столь значительно. По данным K.M. Bagnall et al. [7], в интервале от 8-й до 26-й недели эмбриогенеза поясничный отдел всегда длиннее шейного.

Несмотря на то, что поясничный отдел позвоночника не самый протяженный, у зародышей 11–20-недельного возраста тело закладок поясничных позвонков имеет самую большую среднюю высоту в сравнении с

закладками шейных, грудных и крестцовых позвонков. Об этом также свидетельствуют данные, полученные K.M. Bagnall et al. [7], которые установили, что средняя высота тела закладки грудного позвонка и нижележащего межпозвоночного диска составляет примерно 4/5 средней высоты тела закладки поясничного позвонка вместе с диском.

По данным литературы, у 9–10-недельных плодов человека субъективно самым широким является тело закладок шейных позвонков, а начиная с 11-й недели – тело закладок нижних грудных и верхних поясничных позвонков [1]. Морфометрические данные, полученные в настоящем исследовании, подтверждают тот факт, что в эмбриональном и раннем плодном периоде развития наибольший поперечный размер имеет тело закладок грудных позвонков.

Максимальный переднезадний размер по сравнению с шейными и крестцовыми позвонками был нами выявлен у тела закладок грудных и поясничных позвонков. При измерении параметров тела позвонка на

анатомических препаратах И.Р. Шальнева и соавт. [8] установили, что у 16–17-недельных плодов человека самый большой переднезадний и поперечный размеры из всех грудных позвонков имели тела Th1-3, а на 22-й неделе – тела Th8-12.

При своем появлении центрам окостенения в теле закладок позвонков в разных отделах позвоночника присущи примерно одинаковые размеры [9]. В последующем, в возрастном диапазоне 17–30 недель гестации, средняя высота центра окостенения тела закладки позвонка, выявляемая при компьютерной томографии, прогрессивно увеличивается на протяжении от С1 до S5 [4]. По нашим данным, наибольшие средние линейные размеры и объем имели центры окостенения, расположенные в закладках позвонков тораколюмбального отдела позвоночника. Это связано с появлением данных центров сначала в нижних грудных и верхних поясничных позвонках, а затем в закладках других отделов позвоночника [10]. Более ранним началом процесса окостенения можно объяснить тот факт, что площадь центра оссификации занимает 38% площади поперечного сечения тела закладки поясничных позвонков. Это статистически достоверно больше по сравнению с шейными и крестцовыми позвонками. Вместе с тем у плодов человека в возрастном интервале 11–20 недель гестации выявляется практически одинаковое соотношение объемов костной и хрящевой ткани в закладках тела шейных, грудных и поясничных позвонков. Это, по всей видимости, указывает на одинаковую скорость процессов оссификации хряща и его новообразования.

Соотношение между протяженностью отделов позвоночного столба, выявленное у 11–20-недельных плодов, сопоставимо с аналогичным параметром, характерным для позвоночника в постнатальном онтогенезе. По нашим данным, у плодов 67,5% длины тораколюмбального отдела позвоночника составляет грудной отдел и 32,5% – поясничный. При рождении соотношение этих отделов выражается пропорцией 2/3 к 1/3 [11]. В позвоночном столбе взрослого человека относительная длина шейного, грудного, поясничного и крестцового отделов позвоночника выражается пропорцией 2:5:3:2 [12], то есть так же, как у плодов, самым протяженным является грудной отдел. Это связано с наличием в грудном отделе большего числа позвонков по сравнению с другими отделами позвоночника.

У взрослого человека ширина и высота тел поясничных позвонков примерно в 2 раза больше соответствующих морфометрических параметров шейных позвонков [13]. Средняя ширина тела L1–L5 больше его высоты и примерно равна переднезаднему размеру [14]. По нашим данным, у зародышей 11–20-недельного возраста средний поперечный размер тела закладки поясничных позвонков в 1,8 раза больше его высоты и в 1,5 раза больше переднезаднего размера.

В литературе для описания динамики роста линейных размеров/объема тела закладок позвонков и центров окостенения в них у плодов человека используются линейные [3, 4], параболические [7], логарифмические [15] или экспоненциальные [16] функции. В проанализированной нами выборке установлено, что с возрастом увеличение высоты, поперечного и переднезаднего размеров тела закладок позвонков во всех отделах позвоночного столба носит линейный характер. Более точно, увеличение объема тела закладок позвонков отражает степенная функция, то есть чем больше размеры закладки тела позвонка, тем быстрее они растут в объеме. Н.К. Mekonen et al. [15] установили, что для этого параметра характерен экспоненциальный рост со скоростью ~6,5% в день.

Заключение

Различия морфометрических параметров тел позвонков разной локализации детерминированы генетически и выявляются уже в раннем плодном периоде развития. При этом наибольшие линейные размеры и объем имеют тела закладок поясничных позвонков. Во всех отделах позвоночного столба среднее значение поперечного размера превышает высоту и переднезадний размер тела.

В раннем плодном периоде развития наибольшие средние линейные размеры и объем имеют центры окостенения, расположенные в закладках поясничных и грудных позвонков, так как с них начинается процесс окостенения хрящевых закладок.

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования – С.Л. Кабак.

Сбор и обработка материала – В.В. Заточная.

Написание текста – С.Л. Кабак, В.В. Заточная, Д.М. Гордионик.

Редактирование – С.Л. Кабак.

Author contributions

Conceived the study and designed the experiment – S.L. Kabak.

Collected the data and performed the analysis – V.V. Zatochnyaya.

Wrote the paper – S.L. Kabak, V.V. Zatochnyaya, D.M. Gordionok.

Edited the manuscript – S.L. Kabak.

Литература/References

1. Skórzewska A, Grzymisławska M, Bruska M, Łupicka J, Woźniak W. Ossification of the vertebral column in human fetuses: histological and computed tomography studies. *Folia Morphol (Warsz)*. 2013;72(3):230–8. DOI:10.5603/fm.2013.0038.
2. Baumgart M, Szpinda M, Szpinda A. New anatomical data on the growing C4 vertebra and its three ossification centers in human fetuses. *Surg Radiol Anat*. 2013;35(3):191–203. DOI:10.1007/s00276-012-1022-z.
3. Szpinda M, Baumgart M, Szpinda A, Woźniak A, Mila-Kierzenkowska C. New patterns of the growing vertebra L3 and its 3 ossification centers in human fetuses – a CT, digital and statistical study. *Med Sci Monit Basic Res*. 2013;19:169–80. DOI: 10.12659/MSMBR.883956.

4. Szpinda M, Baumgart M, Szpinda A, Woźniak A, Mila-Kierzenkowska C. Cross-sectional study of C1–S5 vertebral bodies in human fetuses. *Arch Med Sci*. 2015;11(1):174–89. DOI:10.5114/aoms.2013.37086.
5. Friedland GW, De Vries P. Renal ectopia and fusion: Embryologic basis. *Urology*. 1975;5(5):698–706. DOI:10.1016/0090-4295(75)90137-5.
6. O’Rahilly R, Muller F, Meyer DB. The human vertebral column at the end of the embryonic period proper 1. The column as a whole. *J Anat*. 1980;131(3):565–75.
7. Bagnall KM, Harris PF, Jones PR. A radiographic study of the human fetal spine. 3. Longitudinal growth. *J Anat*. 1979;128(4):777–87.
8. Шальнева И.Р., Лященко Д.Н., Галиакбарова В.А. Морфометрические параметры грудного отдела позвоночника и спинного мозга человека в промежуточном плодном периоде онтогенеза. *Современные проблемы науки и образования*. 2016;6:264.
Shalнева IR, Lyashchenko DN, Galiakbarova VA. Morphometric parameters of the human thoracic spine and spinal cord in the intermediate fetal period of ontogenesis. *Modern problems of science and education*. 2016;6:264 (In Russ.).
9. Nolting D, Hansen BF, Keeling J, Kjær I. Prenatal development of the normal human vertebral corpora in different segments of the spine. *Spine*. 1998; 23(21): 2265–71. DOI: 10.1097/00007632-199811010-00003.
10. Кабак С.Л., Заточная В.В., Мельниченко Ю.М., Мохаммади Т.М. Гистологическое исследование оксификации позвонков зародышей человека. *Морфология*. 2019;13(2):27–36.
Kabak SL, Zatochnaya VV, Melnichenko YM, Mohammadi TM. Histological study of human fetuses vertebral column ossification. *Morphologia*. 2019;13(2):27–36 (In Russ.). DOI:0.26641/1997-9665.2019.2.27-36.
11. Canavese F, Dimeglio A. Normal and abnormal spine and thoracic cage development. *World J Orthop*. 2013;4(4):167–74. DOI: 10.5312/wjo.v4.i4.167.
12. Naidich TP, Castillo M, Cha S, Raybaud Ch, Smirniotopoulos JG, Kollias S. (eds.). *Imaging of the spine*. New York: Saunders Elsevier, 2011. Available from: https://books.google.by/books?id=NzyBq_wH1psC&pg=PA45&lpg (Accessed 15th December 2019).
13. Gilad I, Nissan M. Sagittal evaluation of elemental geometrical dimensions of human vertebrae. *J Anat*. 1985;143:115–20.
14. Гайворонский И.В., Кац А.В., Мануковский В.А., Кравцов М.Н. Морфометрические характеристики поясничных позвонков взрослого человека и их прикладное значение для выполнения вертебропластики. *Морфология*. 2008;133(2):29–30.
Gaivoronsky IV, Katz AV, Manukovsky VA, Kravtsov MN. Morphometric characteristics of the lumbar vertebrae of an adult and their applied value for vertebroplasty. *Morphology*. 2008;133(2):29–30 (In Russ.).
15. Mekonen HK, Hiksipoors JP JM, Mommen G, Kruepunga N, Köhler SE, Lamers WH. Closure of the vertebral canal in human embryos and fetuses. *J. Anat*. 2017;231(2):260–74. DOI:10.1111/joa.12638.
16. Schild RL, Wallny T, Fimmers R, Hansmann M. The size of the fetal thoracolumbar spine: a three-dimensional ultrasound study. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2000;16(5):468–72. DOI:10.1046/j.1469-0705.2000.00256.x.

Информация об авторах

Сергей Львович Кабак – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой морфологии человека Белорусского государственного медицинского университета.

Валентина Владимировна Заточная – старший преподаватель кафедры морфологии человека Белорусского государственного медицинского университета.

Дмитрий Михайлович Гординок – ассистент кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии Белорусского государственного медицинского университета.

Author information

Sergey L. Kabak – Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of Human Morphology Department, Belarussian State Medical University. <https://orcid.org/0000-0002-7173-1818>

Valentina V. Zatochnaya – Senior Lecturer, Human Morphology Department, Belarussian State Medical University. <https://orcid.org/0000-0002-6765-2420>

Dmitry M. Gordionok – Assistant Professor, Operative Surgery and Topographic Anatomy Department, Belarussian State Medical University. <https://orcid.org/0000-0002-7224-9345>