

УДК 616.33/.34:[616.98:578.834.1]-018.1-073.43
<http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-3-67-76>

ДИФфуЗИОННО-ТЕНЗОРНАЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ ЗОНЫ РОСТА КОСТИ: ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ И ОЦЕНКА ЕЕ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ

¹Д. А. Бровин[✉]*, ¹Т. Н. Трофимова[✉], ²В. М. Кенис[✉], ²С. А. Брайлов[✉]

¹Институт мозга человека имени Н. П. Бехтерева РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г. И. Турнера, Санкт-Петербург, Россия

ВВЕДЕНИЕ: В последние годы в практике детских ортопедов-травматологов возрос интерес к оценке состояния метаэпифизарной пластинки, связанный с наличием хирургических методик коррекции патологических состояний, связанных с нарушением функции зоны роста. В процессе использования данных методик необходимо оценивать динамику состояния метаэпифизарной пластинки. Существующие методы оценки функционального состояния метаэпифизарной пластинки немногочисленны и несовершенны. Магнитно-резонансная томография (МРТ), в частности методика диффузионно-тензорных изображений (ДТИ), является перспективной для оценки зон роста.

ЦЕЛЬ: Оценить возможность применения методики ДТИ для оценки состояния метаэпифизарной пластинки (зоны роста).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: Исследование одобрено локальным этическим комитетом Института мозга человека им. Н. П. Бехтерева РАН, протокол № 32, от 21.12.2020 г. Информированное согласие получено от каждого законного представителя. На базе НИЦ им. Г. И. Турнера выполнено стандартное магнитно-резонансное исследование коленных суставов, дополненное протоколом диффузионно-тензорной томографии, 75 пациентам в возрасте от 4 до 14 лет (41 — мужского пола, 34 — женского пола) как условно здоровым, так и с наличием патологии зоны роста. Исследования выполнялись на томографе Philips IngeniaElitionX с напряженностью магнитного поля 3 тесла, ДТИ выполнены в корональной плоскости, TE=71,2 мс, TR=4000 мс, значение b-фактора 600 с/мм², применялось 15 направлений диффузии, толщина среза составляла 3 мм без пропусков, размер матрицы составлял 1,25×1,25 мм. Полученные изображения обрабатывались при помощи программного обеспечения DSI Studio с построением трактов, оценкой общего объема и средней длины трактов. Определялась воспроизводимость методики.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Более высокие значения объема и средней длины трактов отмечались у здоровых лиц мужского пола в возрасте пубертата по сравнению с остальными группами. При оценке воспроизводимости стандартные отклонения составляли около 10% от итоговой величины.

ОБСУЖДЕНИЕ: Были получены изображения трактов зон роста. У условно-здоровых лиц пубертатного возраста значения объема трактов, средней длины трактов были выше, чем у лиц препубертатного возраста и лиц с патологиями, влияющими на функциональное состояние зон роста. Параметр средней длины трактов оказался более воспроизводимым, чем параметр общего объема трактов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: При помощи ДТИ можно оценить упорядоченность структур зон роста.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диффузионно-тензорные изображения, трактография, томограф Philips IngeniaElitionX, зоны роста, детская травматология и ортопедия, патология скелета, коленный сустав, DSI studio

*Для корреспонденции: Бровин Даниил Алексеевич, e-mail: danbrovin@mail.ru

Для цитирования: Бровин Д.А., Трофимова Т.Н., Кенис В.М., Брайлов С.А. Диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография зоны роста кости: обоснование методики и оценка ее воспроизводимости // *Лучевая диагностика и терапия*. 2022. Т. 13, № 3. С. 67–76, DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-3-67-76>.

DIFFUSION-TENSOR MAGNETIC RESONANCE IMAGING OF THE GROWTH PLATE: SUBSTANTIATION OF THE METHOD AND EVALUATION OF ITS REPRODUCIBILITY

¹Daniil A. Brovin[✉]*, ¹Tatiana N. Trofimova[✉], ²Vladimir M. Kenis[✉], ²Sergey A. Braylov[✉]

¹N. P. Behtereva Institute of the Human Brain of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

²National Medical Research Center for Pediatric Traumatology and Orthopedics named after G. I. Turner, St. Petersburg, Russia

INTRODUCTION: In recent years there is an increasing interest in assessing the state of the physis among pediatric orthopedic traumatologists, due to the availability of surgical correction of conditions associated with impaired growth plate function. Application of these methods requires dynamic assessment of the state of the physis. The existing methods for assessing the functional state of the physis are few and imperfect. Magnetic resonance imaging (MRI), in particular diffusion tensor imaging (DTI), is promising for assessing the growth plates.

OBJECTIVE: To assess the possibility of applying DTI technique to assess the state of the physis (growth plate).

MATERIALS AND METHODS: The study was approved by the local ethical committee of the Institute of the Human Brain named after N.P. Bekhtereva of Russian Academy of Sciences, protocol No. 32, dated 21.12.2020.

Informed consent was obtained from each legal representative. At the Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery of the Ministry of Health of the Russian Federation a standard magnetic resonance examination of the knee joints was performed, additionally diffusion tensor tomography was performed in 75 patients aged 4.1 to 14.3 years (41 males, 34 females), both deemed healthy and with a known physal pathology. The studies were performed using a Philips Ingenia ElitionX machine with a magnetic field strength of 3 Tesla, DTI was performed in the coronal plane, TE=71.2 ms, TR=4000 ms, b-factor value 600 s/mm², 15 diffusion directions were used, slice thickness was 3 mm without gaps, the matrix size was 1.25×1.25 mm. The resulting images were processed using the DSI Studio software, including tract construction, estimation of the total volume and average length of the tracts. The reproducibility of the technique was assessed.

RESULTS: Higher volumes and mean tract lengths were found in healthy males at puberty compared to other groups. When assessing reproducibility, the standard deviations were about 10% of the final value.

DISCUSSION: Images of growth plate tracts were obtained. In individuals of pubertal age that were deemed healthy, the tract volume values and the average length of the tracts were higher than in individuals of prepubertal age and those with pathological conditions affecting the state of the growth plates. The average tract length turned out to be more reproducible than the total tract volume parameter.

CONCLUSION: With the help of DTI, it is possible to evaluate the arrangement of the structures in the growth plates.

KEYWORDS: diffusion tensor imaging, tractography, Philips Ingenia ElitionX tomograph, growth plates, pediatric traumatology and orthopedics, skeletal pathology, knee joint, DSI studio

*For correspondence: Daniil A. Brovin, e-mail: danbrovin@mail.ru

For citation: Brovin D.A., Trofimova T.N., Kenis V.M., Braylov S.A. Diffusion-tensor magnetic resonance imaging of the growth plates: substantiation of the method and evaluation of its reproducibility // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2022. Vol. 13, No. 3. P. 67–76, DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2022-13-3-67-76>.

Введение. Нарушения линейного роста костей нижних конечностей могут приводить к их укорочению и деформациям. Деформации нижней конечности составляют почти половину (43,7%) от общего числа ортопедических нарушений, наблюдающихся в детском возрасте, из них до 21,4% приходится на патологические изменения на уровне коленного сустава. Деформации коленного сустава, в свою очередь, могут приводить к различным функциональным статико-динамическим изменениям, приводящим к ранней инвалидизации.

Состояния, приводящие к нарушению роста (в том числе и в нижних конечностях), могут быть как врожденными, так и приобретенными.

К врожденным состояниям относят аномалии развития конечностей, а также системные дисплазии скелета, к приобретенным — посттравматические, постинфекционные и нейрогенные поражения [1, с. 48].

Основная функция метаэпифизарной пластинки, также называемой зоной роста или физисом, — продольный рост кости. Зона роста представляет собой пластинку гиалинового хряща, располагающуюся между эпифизом и метафизом трубчатых костей. Первичные (врожденные) или вторичные (приобретенные) нарушения функции метаэпифизарной пла-

стинки приводят к нарушению роста, а следовательно — к укорочению и деформации кости.

В последние годы интерес к оценке состояния метаэпифизарной пластинки и прогнозированию ее функции в практике детских ортопедов-травматологов существенно повысился в связи с широким распространением хирургических методик коррекции патологических состояний, связанных с нарушением функции зоны роста — методик управляемого роста (guided growth), которые применяются для коррекции деформаций конечностей. Методика предполагает временное блокирование зоны роста за счет применения экстра- или трансфизарных металлоконструкций. При использовании данной методики необходимо оценивать динамику изменений для того, чтобы вовремя прервать лечение и не допустить вторичных изменений [2, с. 41–42]. Методы оценки функционального состояния метаэпифизарной пластинки, которые используются для прогнозирования роста, немногочисленны и несовершенно и в большинстве случаев основываются на косвенных данных. В частности, на текущий момент в процессе применения методики управляемого роста врачи оценивают динамику деформации конечностей при помощи последовательных рентгенологи-

ческих исследований. Однако такой подход не позволяет прогнозировать как скорость и потенциал коррекции, так и остаточный потенциал роста, который в дальнейшем может привести к формированию рецидива или обратной деформации, и необходимости множественных повторных корректирующих вмешательств.

Косвенная оценка функционального состояния метаэпифизарных пластинок проводится путем определения роста центильным методом или путем оценки костного возраста [3, с. 2–3]. Эти методы не дают представления об активности конкретных метаэпифизарных пластинок, оценивая лишь общий потенциал роста, кроме того, они разработаны на основе статистического анализа популяционных данных и не учитывают индивидуальных особенностей пациента.

Большие надежды в оценке функционального состояния метаэпифизарной пластинки связывают с методом МРТ. Предпринимались попытки оценки функции зоны роста с помощью полуколичественного определения содержания воды в хрящевой ткани, однако данный метод не получил убедительной доказательной базы [4, с. 541–542]. В последние несколько лет были проведены исследования, оценивающие возможность применения методики диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии (ДТИ) для оценки функционального состояния метаэпифизарной пластинки [5, с. 495–496; 6, с. 213–215; 7, с. 1196–1197; 8, с. 1060–1062; 9, с. 547–549]. Перспективы применения этой методики основаны на особенностях строения зон роста.

Физис (метаэпифизарная пластинка, зона роста) — пластинка гиалинового хряща между эпифизом и метафизом трубчатых костей. Основная функция физиса — рост кости в длину. Данная функция обусловлена строением метаэпифизарной пластинки и особенностями ее клеточного состава. По характеру образующих клеток выделяют пять основных клеточных зон метаэпифизарной пластинки: резервную (зону покоящегося хряща), зону пролиферации, зону гипертрофии, зону кальцификации, зону окостенения. Некоторые авторы также выделяют шестую зону — прегипертрофическую. Она разделяет зону пролиферации и зону гипертрофии (рис. 1) [10].

Одно из основных свойств метаэпифизарной пластинки — это полярность. Это означает, что зоны физиса расположены последовательно в одном направлении от эпифиза к диафизу. Физис считается монополярным, что обеспечивает рост кости преимущественно в одном направлении [12, с. 501–502].

В классификации зон метаэпифизарной пластинки основное значение имеет клеточный состав.

Резервная расположена наиболее близко к эпифизу — это участок фиксации метаэпифизарной пластинки к костным структурам эпифиза. Она характеризуется высоким содержанием межклеточного вещества по отношению к клеткам. В данной

зоне хондроциты относительно неподвижны в межклеточном веществе и представляют собой небольшие сферические клетки, расположенные по отдельности или парами. Отсутствие пролиферирующих клеток послужило причиной названия этой зоны. Предполагается, что хондроциты этой зоны являются своеобразными стволовыми клетками, поддерживающими стабильное количество клеток в пролиферативной зоне [10; 12, с. 501–502].

Зона пролиферации, как следует из ее названия, характеризуется активным процессом пролиферации. Уплощенные, клиновидные клетки данной зоны находятся в основном в аутосинтетической интерфазе, в них часто определяются признаки активных митозов. В пролиферативной зоне клетки расположены столбиками (колонками) вдоль продольной оси метаэпифизарного хряща, что обеспечено расположением коллагеновых волокон основного вещества. Рост эпифизарной пластинки происходит из-за увеличения количества клеток этой зоны и объема межклеточного вещества, в котором большое значение имеют протеогликаны и коллагены II и IX типа.

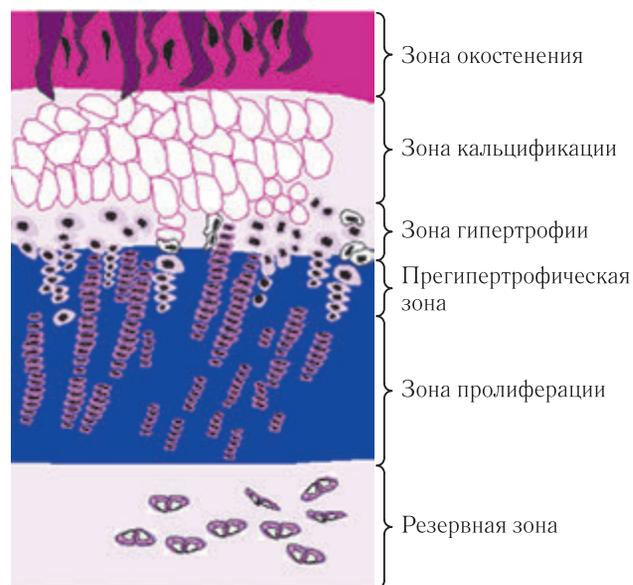


Рис. 1. Зоны физиса [11]

Fig. 1. Zones of the epiphyseal growth plate [11]

В зоне гипертрофии хондроциты утрачивают возможность деления, но сохраняют метаболическую функцию, которая заключается в подготовке внеклеточного вещества к последующей кальцификации и замещению костной тканью. За счет увеличения количества внутриклеточных компонентов, синтеза коллагена X типа клетки этой зоны увеличиваются в 10 раз.

В зонах кальцификации, окостенения происходит гибель хондроцитов, кальцификация матрикса, который впоследствии служит каркасом окостенения для остеобластов. По мере формирования костной ткани она теряет свою упорядоченность, что сказывается на структуре. Этот процесс занимает

определенное время, поэтому чем «моложе» костная ткань, тем более она упорядочена.

Внеклеточное вещество физиса представлено несколькими типами коллагена и протеогликанами, расположено вдоль упорядоченных колонок хондроцитов и создает своеобразный каркас для клеток [10].

Применение методики ДТИ для оценки состояния зоны роста обусловлено возможностью получения векторов и значений диффузии молекул воды в исследуемой зоне и последующим графическим отображением траекторий движения.

ДТИ наиболее часто используется для оценки нервных структур, позволяя визуализировать тракты белого вещества на основании движения жидкости вдоль миелиновых оболочек. Однако на этом возможности методики не заканчиваются: вода может двигаться вдоль других структур, что и является основой для использования ДТИ для оценки диффузии воды в упорядоченном матриксе пролиферативной зоны метаэпифизарной пластинки.

Для получения ДТИ зон роста наибольшее значение имеет именно зона пролиферации. Как уже было сказано, в этой зоне клетки расположены колонками, окруженными каркасом из межклеточного вещества.

Получаемые в результате обработки ДТИ «тракты зоны роста» — это результат визуализации движения жидкости вдоль упорядоченного матрикса метаэпифизарной пластинки. Само по себе понятие «тракты зоны роста» не совсем верно, ведь никаких линейных, нитеподобных структур в зоне роста нет, но в иностранной литературе по этой теме на данный момент применяют именно этот термин [5, с. 491–492; 6, с. 211; 7, с. 1192–1193; 8, с. 1056–1058; 9, с. 545]. Надо понимать, что в результате данного исследования получают лишь схематичное отображение движение жидкости вдоль столбцов хондроцитов и организованных костных структур.

При помощи данной методики можно получить тракты любых длинных трубчатых костей, однако в литературе в основном оцениваются метаэпифизарные пластинки дистального метаэпифизарной отдела бедренной [5, с. 491–493; 6, с. 211–212; 7, с. 1192–1194; 8, с. 1056–1059; 9, с. 546] и проксимального отдела большеберцовой кости [5, с. 491–493; 6, с. 211–212], что связано с крупными размерами данных зон роста, а также с доступностью высококачественных считывающих катушек для исследования коленного сустава.

Включения дополнительного протокола ДТИ в стандартное МР-исследование коленного сустава и последующая обработка полученных данных при помощи специального программного обеспечения позволяют построить тракты зоны роста и определить различные параметры этих трактов. Наибольшее значение имеют следующие параметры: общий объем и средняя длина трактов зоны роста.

С помощью данного типа исследований показано, что у лиц пубертатного возраста, характеризующего-

ся увеличением темпа роста, значения общего объема и длины трактов зоны роста были выше, чем у детей других возрастных групп [5, с. 495–496; 6, с. 213–215; 7, с. 1196–1197]. Также у лиц постпубертатного возраста тракты зоны роста теряли свою организацию и общую направленность [5, с. 495–496].

В длительном наблюдении определялась корреляция между параметрами физиса и прибавкой в росте [6, с. 213–215], что может позволить применять эту методику для оценки потенциала роста.

В литературе имеются работы, посвященные применению данной методики у пациентов с нарушениями роста после лечения нейробластомы высокого риска [8, с. 1056–1058], а также сравнению ДТИ параметров зон роста с объемом зон роста в качестве биомаркеров функции физисов [9, с. 545].

Таким образом, в немногих публикациях, представленных на сегодняшний день, апробированы следующие положения:

- диффузионно-тензорная томография с реконструкцией трактов зон роста позволяет визуализировать направленное движение жидкости в области зон роста и оценить количественные параметры зон роста;

- численные значения измеряемых показателей ДТИ зон роста (в частности, общий объем трактов и средняя длина трактов) были выше у лиц, находящихся на пике скорости роста, и значительно уменьшались после достижения пубертата;

- средняя длина трактов зон роста коррелировала с итоговой прибавкой в росте;

- у пациентов с нарушением роста численные значения ДТИ зон роста были ниже, чем у здоровых лиц.

Цель. Оценка возможности применения методики диффузионно-тензорные изображения (ДТИ) для оценки состояния метаэпифизарной пластинки (зоны роста).

Для достижения данной цели были сформулированы следующие задачи:

- отработка методики ДТИ зон роста;

- оценка повторяемости и воспроизводимости методики ДТИ зон роста;

- оценка параметров МР-трактографии (объем, средняя длина трактов) у здоровых лиц в разных половых и возрастных группах;

- сравнение параметров МР-трактографии у здоровых и больных лиц.

Материалы и методы. Исследование одобрено локальным этическим комитетом Института мозга человека им. Н. П. Бехтерева РАН, протокол № 32 от 21.12.2020 г. Информированное согласие получено от каждого законного представителя. На базе ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии имени Г. И. Турнера» выполнено стандартное МРТ-исследование коленных суставов с получением ДТИ 75 лицам в возрасте от 4 до 14 лет (41 мальчик, 34 девочки). Среди обследуемых большинство (n=59) составили дети, не имеющие патологии

исследуемой зоны роста, проходившие обследование и лечение по поводу заболеваний и травм, не связанных с диагностированным ранее или возможным вовлечением дистальной зоны роста исследованной бедренной кости. Родителям было предложено пройти обследование на добровольной основе (при условии подписания информированного согласия). Также в исследование вошли 16 пациентов с патологией дистальной зоны роста исследованной бедренной кости (осевые деформации исследованной конечности — у 8 детей, системные дисплазии скелета — у 2 детей, также у 6 пациентов исследование проведено в процессе коррекции осевых нарушений методом управляемого роста) (рис. 2).

Основным критерием включения являлось выполненное МР-исследование коленного сустава с получением ДТИ. Исследование выполнялось пациентам, способным пройти его без седации (пациенты младшего возраста зачастую не способны пройти исследование без медикаментозного сопровождения), без абсолютных противопоказаний.

Критериями исключения являлись выраженные двигательные артефакты изображений (n=3), проведение методики с нарушением позиционирования срезов (n=1), полное визуальное отсутствие зоны роста (гистологически верифицированная гемимеллическая эпифизарная дисплазия, болезнь Тревора, n=1), некачественные изображения (n=1).

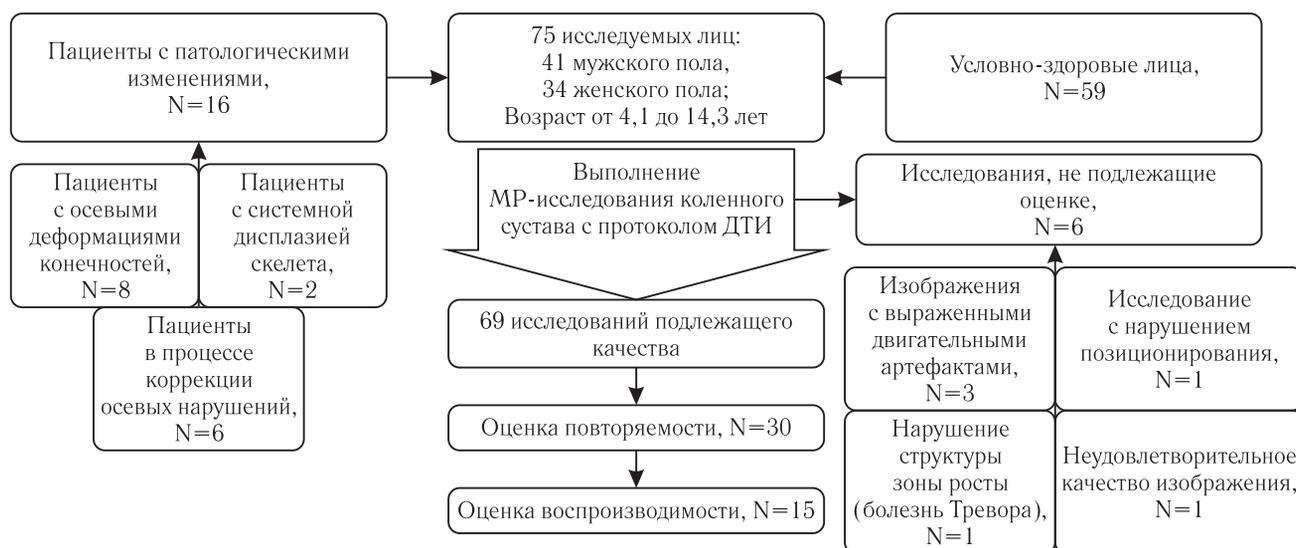


Рис. 2. Схема исследования
Fig. 2. Study scheme

Обследуемые лица были разделены на группы по возрасту и полу, а также по наличию/отсутствию патологии (рис. 3). Были выделены две возрастные категории в каждой половой группе: возраст до начала полового созревания — девочки до 11 лет (здоровые лица — 11, лица с патологией — 4), мальчики до 13 лет (здоровые лица — 26, лица с патологией — 9), возраст полового созревания — девочки 11–15 лет (здоровые лица — 17, лица

МРТ-исследования выполнялись на томографе Philips IngeniaElitionX с индукцией магнитного поля 3 тесла. Структурные исследования были дополнены ДТИ, выполненными в корональной плоскости, TE=71.2 мс, TR=4000 мс, значение b-фактора 600 с/мм², применялось 15 направлений диффузии, толщина среза составляла 3 мм без пропусков, размер матрицы составлял 1,25×1,25 мм. Время сканирование составляло в районе 6 минут. Значение дан-

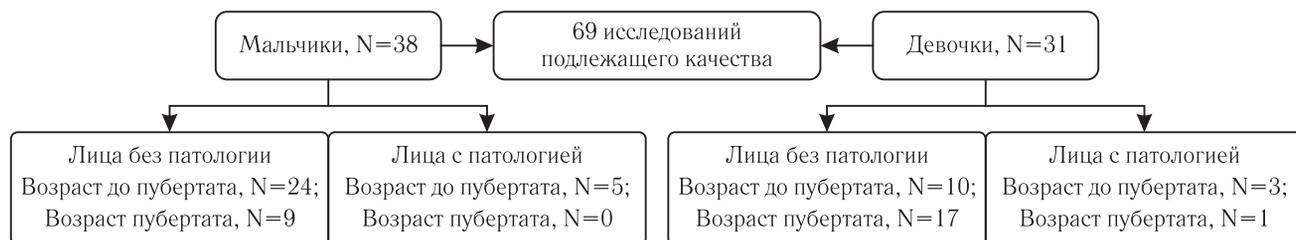


Рис. 3. Распределение исследуемых лиц по группам
Fig. 3. Distribution of the studied individuals by groups

с патологией — 2), мальчики 13–17 лет (здоровые лица — 5, лица с патологией — 1).

На полученных ДТИ оценивались параметры зоны роста дистального отдела бедренной кости.

ных параметров подбирались на основании результатов предыдущих исследований [5, с. 491–493; 6, с. 211–212; 7, с. 1192–1194; 8, с. 1056–1059; 9, с. 546; 13, с. 296].

Полученные изображения обрабатывались при помощи программного обеспечения DSI Studio (Oct 24 2020 build) с выполнением трех этапов получения трактографии (открытие изображений, реконструкция, трекинг и анализ). На третьем этапе на основании анатомических ориентиров и вектора диффузии каждого вокселя (рис. 4, *а*) выстраивалась зона интереса (рис. 4, *б*), а также со стороны эпифиза выстраивалась зона исключения (рис. 4, *в*). Зона роста выделялась на каждом срезе. По выбранной зоне интереса

оценки повторяемости одним специалистом было выполнено пятикратное построение «трактов» зон роста на 30 исследованиях с оценкой общего объема и средняя длина трактов.

Для оценки воспроизводимости три независимых врача лучевой диагностики, ознакомленные с техникой применения методики, выполняли однократное построение трактов зон роста на 15 исследованиях с оценкой общего объема и средняя длина трактов.



Рис. 4. Этапы построения трактов зоны роста, пациент (мальчик) 11 лет, без патологических изменений: *а* — оценка вектора диффузии каждого вокселя; *б* — построение зоны интереса (розовый цвет); *в* — построение зоны исключения (желтый цвет)

Fig. 4. Stages of the growth palate tracts construction, patient (11-year-old boy), without any pathological changes: *a* — assessment of the diffusion vector in each voxel; *б* — construction of the area of interest (pink color); *в* — building an exclusion area (yellow color)

строились тракты со следующими параметрами: значение фракционной анизотропии $=0,15$; максимальный угол поворота $=40^\circ$; без ограничения по минимальной длине; тракты выстраивались до тех пор, пока общее их количество не достигало 5000. Использовалась стандартная цветовая индикация (рис. 5). Затем определялись общий объем трактов и средняя длина трактов.

Результаты трактографии были оценены на предмет повторяемости и воспроизводимости с определением параметров стандартного отклонения. Для

Результаты. После исключения исследований ненадлежащего качества осталось 69 исследований, подлежащих оценке. На основе данных исследования оценивались общий объем и длина трактов. Результаты представлены в табл. 1.

Значения объема и средней длины трактов были выше у здоровых лиц по сравнению с лицами с подтвержденными патологическими изменениями.

У лиц мужского пола значения объема и средней длины трактов были выше, чем у лиц женского пола в аналогичных возрастных группах.

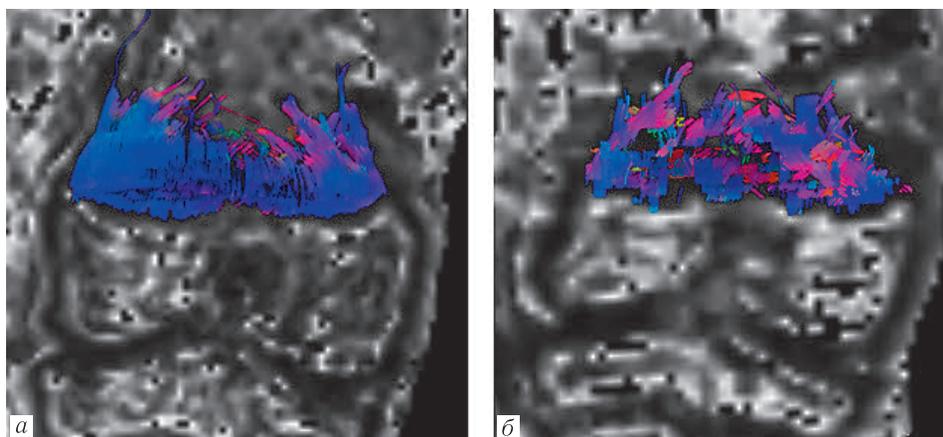


Рис. 5. «Тракты» зоны роста: *а* — мальчик 11 лет, без патологических изменений; *б* — девочка 10 лет, с нарушением роста

Fig. 5. «Tracts» of the growth plate: *a* — 11-year-old boy, no pathological changes; *б* — 10-years-old girl with a growth disorder

Средние параметры МР-трактографии в зависимости от возраста, пола, наличия/отсутствия патологии

Таблица 1

Average parameters of MR tractography depending on age, gender, presence/absence of pathology

Table 1

Показатель	Мальчики, n=38			
	до пубертата, n=33		период пубертата, n=9	
	без патологии (n=24)	с патологическими изменениями (n=5)	без патологии (n=9)	с патологическими изменениями (n=0)
Объем трактов, мм ³	8506,82±1323,04	5 884,18±988,07	13 518,24±2022,50	—
Средняя длина трактов, мм	7,63±1,60	4,90±0,31	9,51±2,06	—
	Девочки, n=31			
	до пубертата, n=13		период пубертата, n=18	
	без патологии, n=10	с патологическими изменениями, n=3	без патологии, n=17	с патологическими изменениями, n=1
Объем трактов, мм ³	7559,76±2843,39	3 883,59±1511,32	9779,17±1863,96	5060,74
Средняя длина трактов, мм	6,42±1,51	3,93±0,69	8,33±2,30	3,87

У лиц в возрасте пубертата значения объема и средней длины трактов были выше, чем у лиц до начала полового созревания в аналогичных половых группах.

Для оценки повторяемости и воспроизводимости определялись значения стандартного отклонения.

Стандартное отклонение длины трактов не превышало 1 мм, в среднем было равно 0,2 мм в условиях повторяемости, 0,5 мм — в условиях воспроизводимости, что составляло в среднем около 3% от измеряемого параметра.

При измерении объема трактов стандартные отклонения составляли около 10% от итоговой величины (табл. 2).

Обсуждение. Основная функция метаэпифизарной пластинки — рост кости в длину. Данная функция обеспечена особенностями строения метаэпифизарной пластинки — в ее структуре имеется несколько

при помощи данной методики можно косвенно оценить состояние метаэпифизарной пластинки.

Оценка состояния метаэпифизарной пластинки в детском возрасте особенно важна, так как нарушения ее структуры и функции приводят к нарушениям роста. В настоящее время у специалистов в области детской травматологии и ортопедии имеются возможности коррекции некоторых патологических состояний, связанных с нарушениями функции зоны роста, но эти специалисты нуждаются в методах оценки метаэпифизарной пластинки для своевременной корректировки лечения. Таким методом может стать диффузионно-тензорная трактография с последующим построением трактов зон роста.

Нами была отработана методика ДТИ на 75 исследованиях коленного сустава. В выборку вошли как дети без патологических изменений в изученной дистальной

Значение стандартного отклонения параметров ДТИ зон роста

Таблица 2

The standard deviation value of the growth plates DTI parameters

Table 2

Предмет оценки	Среднее стандартное отклонение, σ	Максимальное стандартное отклонение, σ	Средний % стандартного отклонения от средней величины
Длина «трактов» в условиях повторяемости	0,23 мм	0,6 мм	3%
Длина «трактов» в условиях воспроизводимости	0,5 мм	0,74 мм	3,2%
Объем «трактов» в условиях повторяемости	1 002,5 мм ³	2073 мм ³	11%
Объем «трактов» в условиях воспроизводимости	896,7 мм ³	2266 мм ³	10,7%

ко зон, расположенных последовательно, т.е. она обладает полярностью. Матрикс зоны роста имеет столбчатое строение, это обеспечивает движение жидкости через всю метаэпифизарную пластинку.

Методика МР-трактографии позволяет визуализировать движение жидкости вдоль организованных структур, в основном вдоль миелиновых оболочек серого вещества, однако движение жидкости можно визуализировать и в других структурах, например движение жидкости вдоль столбчатых структур матрикса метаэпифизарной пластинки. Таким образом,

в зоне роста бедренной кости, так и пациенты с верифицированными патологическими изменениями в ней.

Полученные диффузионно-тензорные изображения анализированы при помощи специального программного обеспечения для построения и оценки трактов, что позволило оценить общий объем и среднюю длину построенных трактов, а также сравнить полученные данные с имеющимися в литературе [5, с. 495–496; 6, с. 213–215; 7, с. 1196–1197; 8, с. 1056–1058; 9, с. 545], при этом оценивали общий объем и среднюю длину построенных трактов.

Выявленные нами значения общего объема и средней длины трактов были больше у лиц в пубертатном возрасте, чем у лиц более младшего возраста. Данные результаты подтверждают предположение о влиянии интенсивности роста на изученные параметры ДТИ, поскольку в период пубертата (девочки 11–15 лет, мальчики 13–17 лет) определяется пик скорости роста (наибольшая прибавка в росте за промежутки времени), что в том числе обеспечено ростом трубчатых костей в длину, то есть зоны роста в эти периоды более активны.

Также было выявлено, что тракты у обследованных детей без патологии метаэпифизарной пластинки имели параметры общего объема и средней длины выше, чем у лиц с патологическими изменениями зоны роста. Наиболее наглядно это прослеживается у пациентов с наличием асимметрии конечностей, связанной с нарушением зон роста только в одной конечности.

На основании этих данных, можно предположить наличие связи между длиной трактов и скоростью роста. Чем активнее идет процесс пролиферации, тем более структурирована метаэпифизарная пластинка, тем большую высоту имеют колонки хондроцитов, что отображает более активный процесс деления. Так как тракты условно отображают столбики матрикса, то можно предположить, что размеры трактов косвенно отображают активность зоны роста.

Полученные нами результаты согласуются с предыдущими исследованиями, касающимися данной методики [5, с. 495–496; 6, с. 213–215; 7, с. 1196–1197; 9, с. 545]. В частности, численные характеристики ДТИ зон роста выше у лиц в пубертатном возрасте, чем у лиц младшего возраста.

Также не менее важно оценивать выявлять асимметрию зон роста, отражающую потенциал прогрессирования деформации. Так, наличие выраженных различий параметров общего объема и средней длины трактов на разных конечностях может сигнализировать об одностороннем нарушении функции зоны роста до появления клинических изменений, а абсолютные параметры ДТИ находятся в рамках нормальных значений. Например, такое предположение может быть высказано в том случае, если значения общего объема и средней длины трактов на одной конечности соответствуют минимально допустимым для данной возрастной группы, а на другой конечности параметры трактов находятся на уровне верхних значений данной возрастной группе. При получении подобных результатов лечащий врач может планировать коррекцию патологического состояния еще до появления клинической симптоматики.

По нашим данным, средняя длина трактов зоны роста оказалась более воспроизводимым параметром, чем объем зоны роста. Наиболее вероятно, это связано с тем, что объем зоны роста больше зависит от объема выделенной вручную зоны интереса (опе-

раторозависимое измерение). В доступной литературе по этому вопросу описывалось выполнение оценки воспроизводимости, однако не указывалась воспроизводимость конкретных параметров.

В процессе построения трактов при помощи специального программного обеспечения мы столкнулись с определенными сложностями.

Соответствующее программное обеспечение разработано для работы преимущественно с белым веществом головного и спинного мозга. Плотность трактов в структуре зон роста значительно меньше таковой в структуре головного мозга. Это привело к необходимости подбора особых параметров построения трактов. При построении трактов при помощи программы DSI studio можно вручную определить необходимое количество выстраиваемых трактов, оперируя значениями «seed» и «tract». «Seed» — точка запуска тракта, от которой происходит поиск соседних вокселей с соответствующим направлением диффузии воды. «Tract» — визуализированное в форме линии направление диффузии жидкости. В высокоупорядоченных структурах, например, в головном и спинном мозге, практически каждый «seed» «всходит», позволяя получить тракт, поэтому при построении трактов нервных структур количество «seed»-ов практически равняется количеству построенных трактов. При построении трактов в зоне роста, где упорядоченность структур менее выражена, нежели чем в тканях головного и спинного мозга, многие «seed-ы» не находят продолжения в прилежащих вокселях. Наш опыт показал, что при построении свыше 4000 построенных трактов увеличение количества трактов не давало значимого возрастания общего объема и средней длины трактов. Это было обусловлено построением новых трактов в области уже построенных. На основании данных наблюдений нами было принято решение выстраивать тракты зоны роста до тех пор, пока итоговое количество трактов не становилось равным 5000 (данное значение было выбрано эмпирически).

Важным вопросом является исключение ложных трактов, под которыми мы понимаем тракты, распространяющиеся в зону эпифиза. Поскольку метаэпифизарные пластинки обладают полярностью, колонки хондроцитов могут распространяться только в сторону диафиза. Наличие ошибочно построенных трактов приводит к искажению результатов. Для минимизации таких искажений нами было решено при построении трактов использовать зоны «зоны исключения». Если при построении тракт распространяется в данную зону, программа удаляет этот тракт, что, соответственно, позволяет увеличить точность методики. В представленных публикациях [5, с. 495–496; 6, с. 213–215; 7, с. 1196–1197; 8, с. 1056–1058; 9, с. 545] такое ограничение и его влияние на результаты не описывалось.

Среди ограничений применения методики следует отметить дезорганизацию зоны роста, когда колонки хондроцитов расположены хаотично. Подобные изменения описаны при некоторых системных дисплазиях скелета, например, гемимелической эпифизарной дисплазии (болезнь Тревора) [14, с. 10–11]. У лиц с подобными состояниями правильно определить зону интереса не представляется возможным, а при выстраивании зоны роста с допущениями результаты могут быть значительно искажены.

Важно отметить, что тракты, визуализируемые при помощи методики ДТИ, имеют больший общий объем, чем определяемая на структурных МР-изображениях метаэпифизарная пластинка [15, с. 451–453]. Мы предполагаем, что это может быть связано с тем, что формирующаяся костная ткань определенный период сохраняет столбчатую структуру, вдоль которой жидкость продолжает двигаться упорядоченно. Уменьшение трактов зон роста у лиц

в постпубертатном периоде связано с нарушением столбчатой структуры, формированием остеонов.

Методика ДТИ позволяет визуализировать движение жидкости вдоль структур метаэпифизарной пластинки. Предполагается, что чем длиннее тракты, тем большую высоту имеют колонки хондроцитов и меньшим изменением подверглась сформированная костная ткань, поскольку структура свежесформированной костной ткани еще не успела потерять свою упорядоченность.

Заключение. Таким образом, методика ДТИ позволяет оценить упорядоченность структуры зон роста, их размеры и симметричность. Вероятно, это косвенно отражает их функциональную активность, что делает рассматриваемую методику весьма перспективным инструментом при анализе патологических состояний, влияющих на функциональную активность зон роста, а также для решения прогностических задач.

Сведения об авторах:

Бровин Даниил Алексеевич — аспирант федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт мозга человека имени Н. П. Бехтерева» Российской академии наук; 197376, Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, д. 9; e-mail: danbrovin@mail.ru; ORCID 0000–0002–2611–7691;

Трофимова Татьяна Николаевна — доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нейровизуализации федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт мозга человека имени Н. П. Бехтерева» Российской академии наук; 197376, Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, д. 9; e-mail: ttrofimova@groupmmc.ru; ORCID 0000–0003–4871–2341;

Кенис Владимир Маркович — доктор медицинских наук, профессор, заместитель директора по инновационному развитию и работе с регионами, руководитель отделения патологии стопы, нейроортопедии и системных заболеваний федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г. И. Турнера» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 196603, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ул. Парковая, д. 64–68; профессор кафедры детской травматологии и ортопедии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И. И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 191015, Санкт-Петербург, Кирочная ул., д. 41; e-mail: kenis@mail.ru; ORCID 0000–0002–7651–8485;

Брайлов Сергей Александрович — заведующий отделением лучевой диагностики федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г. И. Турнера» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 196603, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Парковая ул., д. 64–68; e-mail: sergeybraylov@mail.ru; ORCID 0000–0003–2372–9817.

Information about authors:

Daniil A. Brovin — radiologist, N. P. Behtereva Institute of the Human Brain of the Russian Academy of Sciences; graduate student; 9 Academic Pavlova st.; St. Petersburg, 197376, Russia; e-mail: danbrovin@mail.ru; ORCID 0000–0002–2611–7691;

Tatiana N. Trofimova — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Sci. (Med.), professor, radiologist, N. P. Behtereva Institute of the Human Brain of the Russian Academy of Sciences; The main specialist of the laboratory of neuroimaging; 9 Academic Pavlova st.; St. Petersburg, 197376, Russia; e-mail: ttrofimova@groupmmc.ru; ORCID 0000–0003–4871–2341;

Vladimir M. Kenis — Dr. of Sci. (Med.), professor, traumatologist, H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery of the Ministry of Health of the Russian Federation; Head of the department of foot pathology, neuroorthopedics and Systemic Diseases; 64–68 Parkovaya st., Pushkin, St. Petersburg, 196603, Russia; North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov of the Ministry of Health of the Russian Federation; Professor of the department of pediatric traumatology and orthopedics; 41 Kirochnaya st., St. Petersburg, 191015, Russia; e-mail: kenis@mail.ru; ORCID 0000–0002–7651–8485;

Sergey S. Braylov — Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery of the Ministry of Health of the Russian Federation; Head of radiology department; 64–68 Parkovaya st., Pushkin, St. Petersburg, 196603, Russia; e-mail: sergeybraylov@mail.ru; ORCID 0000–0003–2372–9817.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — *Т. Н. Трофимова, В. М. Кенис*; сбор и математический анализ данных — *Д. А. Бровин, С. А. Брайлов*; подготовка рукописи — *Д. А. Бровин, Т. Н. Трофимова, В. М. Кенис, С. А. Брайлов*.

Author contribution. All authors met the ICMJE authorship criteria. Special contribution: *TNT, VMK* aided in the concept and plan of the study; *DAB, SAB* provided collection and mathematical analysis of data; *DAB, TNT, VMK, SAB* preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure. The authors declare no conflicts of interest.

Соответствие принципам этики: Исследование одобрено локальным этическим комитетом Института мозга человека им. Н. П. Бехтерева РАН, протокол № 32, от 21.12.2020 г., информированное согласие получено от каждого законного представителя.

Funding: The study was approved by the local ethical committee of the Institute of the Human Brain named after N. P. Bekhtereva Russian Academy of Sciences, protocol No. 32, dated 12/21/2020, informed consent is obtained from each legal representative of the patient.

Поступила/Received: 23.08.2022

Принята к печати/Accepted: 15.09.2022

Опубликована/Published: 30.09.2022

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCE

1. Куркин С.А., Бахтеева Н.Х., Царева Е.Е. и др. Хирургическое лечение тяжелых деформаций коленного сустава у подростков // *Травматология и ортопедия России*. 2009. № 4. С. 48–52. Kurkin S.A., Bahteeva N.H., Careva E.E. et al. Hirurgicheskoe lechenie tzhazhelyh deformacij kolennogo sustava u podrostkov // *Travmatologija i ortopedija Rossii*. 2009. No 4. S. 48–52. [Kurkin S.A., Bakhteeva N.H., Tsareva E.E. et al. Surgical treatment of severe knee deformities in adolescents. *Traumatology and Orthopedics of Russia*, 2009. No. 2, pp. 48–52 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/2311-2905-1856>.

2. Кенис В.М., Моренко Е.С., Сапоговский А.В. Зависимость расположения восьмибразных пластин при гемиепифизедезе от рентгенометрических параметров эпиметафизарного перехода кости // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2018. Т. 10, № 2. С. 37–43. Kenis V.M., Morenko E.S., Sapogovskij A.V. Zavisimost' raspolozhenija vos'miobraznyh plastin pri gemijeipifizeeдеze ot rentgenometricheskikh parametrov jepimetafizarnogo perehoda kosti // *Ortopediya, travmatologiya i vosstanovitel'naja hirurgiya detskogo vozrasta*. 2018. T. 10, No. 2. S. 37–43. [Kenis V.M., Morenko E.S., Sapogovskij A.V. Dependence of the 8-plate position inhemiepiphysiodesis on the x-ray parameters of the epimetaphyseal bone junction. *Pediatric orthopedics, traumatology and reconstructive surgery*, 2018, Vol. 10, No 2, pp. 37–43 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/PTORS6237-43>.
3. Martin D., Wit J., Hochberg Z. et al. The use of bone age in clinical practice. Part 1 // *Hormone Research in Paediatrics*. 2011. Vol. 76, No. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1159/000329372>.
4. Shiguetomi-Medina J., Rahbek O., Abood A. et al. Thermal epiphysiodesis performed with radio frequency in a porcine model // *Acta orthopaedica*. 2014. Vol. 85, No. 5. P. 538–542. <https://doi.org/10.3109/17453674.2014.939014>.
5. Jaimes C., Berman J., Delgado J. et al. Diffusion-tensor imaging of the growing ends of long bones: Pilot demonstration of columnar structure in the physes and metaphyses of the knee // *Radiology*. 2014. Vol. 273, No. 2. P. 491–501. <https://doi.org/10.1148/radiol.14132136>.
6. Bedoya M., Delgado J., Berman J. et al. Diffusion-tensor imaging of the physes: A possible biomarker for skeletal growth-experience with 151 children // *Radiology*. 2017. Vol. 284, No. 1. P. 210–218. <https://doi.org/10.1148/radiol.2017160681>.
7. Barrera C., Bedoya M., Delgado J. et al. Correlation between diffusion tensor imaging parameters of the distal femoral physis and adjacent metaphysis, and subsequent adolescent growth // *Pediatric Radiology*. 2019. Vol. 49, No. 9. P. 1192–1200. <https://doi.org/10.1007/s00247-019-04443-z>.
8. Delgado J., Jaramillo D., Chauvin N. et al. Evaluating growth failure with diffusion tensor imaging in pediatric survivors of high-risk neuroblastoma treated with high-dose cis-retinoic acid // *Pediatric Radiology*. 2019. Vol. 49, No. 8. P. 1056–1065. <https://doi.org/10.1007/s00247-019-04409-1>.
9. Duong P., Mostoufi-Moab S., Raya J. et al. Imaging Biomarkers of the Physis: Cartilage Volume on MRI vs. Tract Volume and Length on Diffusion Tensor Imaging // *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2020. Vol. 52, No. 2. P. 544–551. <https://doi.org/10.1002/jmri.27076>.
10. Заварухин В.И., Моренко Е.С., Свиридов М.К., Говоров А.В. Эмбриональное развитие и строение зоны роста // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2015. Т. 3, № 2. С. 61–65. Zavarukhin V.I., Morenko E.S., Sviridov M.K., Govorov A.V. Jembrional'noe razvitie i stroenie zony rosta // *Ortopediya, travmatologiya i vosstanovitel'naja hirurgiya detskogo vozrasta*. 2015. T. 3, No. 2. S. 61–65. [Zavarukhin V.I., Morenko E.S., Sviridov M.K., Govorov A.V. Embryonic development and the structure of the growth plate. *Pediatric orthopedics, traumatology and reconstructive surgery*. Vol. 3, No. 2, pp. 61–65 (In Russ.)] <https://doi.org/10.17816/PTORS3261-65>.
11. Cartilage, Bone and Ossification: The Histology Guide. https://www.histology.leeds.ac.uk/bone/bone_ossify.php (дата обращения 05.09.2022).
12. Ağirdil Y. The growth plate: a physiologic overview // *EFORT Open Reviews*. 2020. Vol 5, N 8. P. 498–507. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.5.190088>.
13. Zhao Q., Ridout R.P., Shen J. et al. Effects of Angular Resolution and b Value on Diffusion Tensor Imaging in Knee Joint // *Cartilage*. 2021. Vol. 13, No. 2. P. 295–303. <https://doi.org/10.1177/19476035211007909>.
14. Baumfeld D., Pires R., Macedo B. et al. Trevor Disease (Hemimelic Epiphyseal Displasia): 12-year Follow-up Case Report and Literature Review // *Annals of Medical and Health Sciences Research*. 2014. Vol. 4, No. 1. <https://doi.org/10.4103/2141-9248.131689>.
15. Jaimes C., Chauvin N., Delgado J. et al. MR imaging of normal epiphyseal development and common epiphyseal disorders // *Radiographics*. 2014. Vol. 34, No. 2. P. 449–471. <https://doi.org/10.1148/rg.342135070>.

Открыта подписка на 1-е полугодие 2023 года.

Подписной индекс:

Объединенный каталог «Пресса России» **42177**