

Рост неостриатума во время плодного периода развития человека

*А.Е. Прощина, Е.О. Грушецкая, О.С. Годовалова, А.С. Харламова,
Ю.С. Кривова, Д.А. Отлыга, Е.Г. Отлыга, Г.А. Сонин, С.В. Савельев*

Научно-исследовательский институт морфологии человека имени академика А.П. Авцына
ФГБНУ «Российский научный центр хирургии имени академика Б.В. Петровского», Москва, Россия

Резюме. *Введение.* Неостриатум – обширная подкорковая область головного мозга, включающая в себя хвостатое ядро и скорлупу и играющая важную роль в формировании двигательных функций. Морфометрические исследования развития неостриатума человека во время пренатального периода немногочисленны, что является препятствием для оценки морфогенеза этой области мозга. Целью работы было исследование объема хвостатого ядра и скорлупы для уточнения нормальной динамики развития неостриатума человека во время плодного периода.

Материалы и методы. На серийных срезах головного мозга восьми плодов человека с 12-й по 30-ю неделю гестационного развития, окрашенных гистологическими методами, были вычислены объем хвостатого ядра и скорлупы.

Результаты. С 12-й по 30-ю неделю гестационного развития объем хвостатого ядра увеличивается более чем в 400 раз, а скорлупы в 250 раз. Полученные данные сопоставимы с результатами работ, полученных как при помощи классических гистологических, так и современных неинвазивных методов визуализации. По всей видимости, это совпадение связано с большой плотностью расположения нейробластов в неостриатуме во время плодного периода, что нивелирует артефакты проводки, связанные с обезвоживанием образца.

Заключение. Быстрый темп нейрогенеза неостриатума во время пренатального развития человека свидетельствует о первостепенной важности формирования двигательных функций. Накопление данных о нормальном развитии хвостатого ядра и скорлупы может внести вклад в раннюю диагностику моторных нарушений.

Ключевые слова: хвостатое ядро, скорлупа, базальные ганглии, развитие мозга человека

Для корреспонденции: Александра Евгеньевна Прощина. E-mail: proshchina@yandex.ru

Для цитирования: Прощина А.Е., Грушецкая Е.О., Годовалова О.С., Харламова А.С., Кривова Ю.С., Отлыга Д.А., Отлыга Е.Г., Сонин Г.А., Савельев С.В. Рост неостриатума во время плодного периода развития человека. *Клин. эксп. морфология.* 2025;14(2):36–42. DOI: 10.31088/CEM2025.14.2.36-42.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-15-00172.

Статья поступила 04.09.2024. Получена после рецензирования 10.10.2024. Принята в печать 02.12.2024.

Developmental growth of the human neostriatum during fetal stages

*A.E. Proshchina, E.O. Grushetskaya, O.S. Godovalova, A.S. Kharlamova,
Yu.S. Krivova, D.A. Otylga, E.G. Otylga, G.A. Sonin, S.V. Saveliev*

Avtsyn Research Institute of Human Morphology of FSBSI “Petrovsky National Research Center of Surgery”, Moscow, Russia

Abstract. *Introduction.* The neostriatum is a large subcortical brain area that includes the caudate nucleus and putamen and plays a crucial role in motor function. There are few studies on the development of the human neostriatum in the prenatal period, which makes it difficult to understand the morphogenesis of this region. The aim of this study was to investigate the volumes of the caudate and putamen in order to understand the normal development of the neostriatum during fetal stages.

Materials and methods. The volumes of the caudate nucleus and putamen were measured on serial sections of the brains of 8 human fetuses between weeks 12 and 30 of gestational development. The sections were histologically stained.

Results. Between weeks 12 and 30 of gestation, the caudate nucleus and putamen volumes increased by more than 400 and 250 times, respectively. These data are comparable to the results obtained using both classical histological methods and modern noninvasive imaging techniques. This similarity is likely to be

due to high density of neuroblasts in the neostriatum during fetal development, which eliminates artifacts associated with sample dehydration.

Conclusion. The rapid rate of neurogenesis in the neostriatum during human prenatal development indicates the crucial importance of motor development. Accumulating data on the normal development of the caudate nucleus and putamen could contribute to early diagnosis of motor disorders.

Keywords: caudate nucleus, putamen, basal ganglia, human brain development

Corresponding author: Alexandra E. Proshchina. E-mail: proshchina@yandex.ru

For citation: Proshchina A.E., Grushetskaya E.O., Godovalova O.S., Kharlamova A.S., Krivova Yu.S., Otyga D.A., Otyga E.G., Sonin G.A., Saveliev S.V. Developmental growth of the human neostriatum during fetal stages. *Clin. exp. morphology.* 2025;14(2):36–42 (In Russ.). DOI: 10.31088/CEM2025.14.2.36-42.

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-15-00172.

Received 04.09.2024. **Received in revised form** 10.10.2024. **Accepted** 02.12.2024.

Введение

Базальные ядра (БЯ, базальные ганглии, *nuclei basalis*) играют важную роль в регуляции моторных функций. Дисфункция БЯ, которая может возникать вследствие болезней или травм, приводит к разнообразным нарушениям двигательных навыков. Еще в первой половине XX века была установлена взаимосвязь патологических изменений БЯ с возникновением непроизвольных движений (гиперкинезов), включая хорею, баллизм, атетоз, дистонию и трудности при выполнении произвольных движений при паркинсонизме [1, 2].

Неостриатум (дорсальный стриатум), крупнейшая подкорковая структура мозга млекопитающих, является частью БЯ. Неостриатум включает в себя хвостатое ядро (ХЯ, *nucleus caudatus*) и скорлупу (Ск, *putamen*). Помимо связей с корой и таламусом неостриатум образует многочисленные реципрокные связи с дофаминергическими нейронами черной субстанции и, таким образом, участвует в осуществлении целенаправленного поведения, а также обучении моторным навыкам. Обнаружено, что неостриатум взрослых млекопитающих неоднороден как в химическом, так и цитоархитектоническом отношении. Эта гетерогенность была продемонстрирована с помощью различных иммуногистохимических и цитохимических маркеров и у плодов человека [3]. Однако недостаточно изучено, как эта неоднородность возникает в процессе развития [4].

Морфометрический анализ во время внутриутробного развития имеет решающее значение для оценки нормального роста мозга [5], что представляет интерес для своевременной диагностики различных патологий, а также биологии развития в целом [6]. До недавнего времени морфометрический анализ неостриатума был доступен только при применении классических гистологических методов. Из-за кропотливости такой обработки эти исследования остаются крайне немногочисленными. Сегодня развитие неостриатума можно изучать с использованием как прижизненной, так и посмертной магнитно-резонансной томографии [5]. С определенными ограничениями возможны и визуализация, и измерение размеров неостриатума плода человека при помощи трансвагинальной 3D нейросонографии [7]. Тем не менее до сих пор развитие не-

остриатума морфометрически изучено недостаточно, а результаты, полученные разными способами, нуждаются в сопоставлении.

Целью данного исследования являлся морфометрический анализ неостриатума, включая ХЯ и Ск, во время нормального плодного развития мозга человека с целью уточнения динамики роста этих структур.

Материалы и методы

Исследование выполнено на аутопсийном материале головного мозга восьми плодов человека с 12-й по 30-ю неделю гестационного развития (гр) из коллекции лаборатории развития нервной системы НИИ морфологии человека им. акад. А.П. Авцына РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского [8]. Работа одобрена локальным этическим комитетом НИИ морфологии человека (№ 33(9) от 07.02.2022). Возраст эмбрионов и плодов оценивали на основании анамнеза (дата последней менструации, протоколы ультразвукового исследования), а затем определяли по весу/росту и теменно-копчиковой длине (ТКД) в соответствии с таблицами определения возраста для фетального периода [9]. Критерием включения было отсутствие клинических или посмертных признаков патологии головного мозга.

В зависимости от возраста плодов получали тотальные препараты головы целиком или одного из полушарий головного мозга. Образцы обрабатывали рутинными гистологическими методами и делали полные серии фронтальных срезов толщиной 10 мкм (до 20 недель гр) или 20 мкм (после 20 недель гр). Каждый 10-й (для плодов до 20 недель гр) или 25-й срез (после 20-й недели) окрашивали по одной из традиционных гистологических методик (по Ниссло, гематоксилином и эозином, по Маллори).

Для объемного анализа структур были отобраны срезы, содержащие ХЯ и Ск, расположенные через равные промежутки.

Для каждого образца мозга сделаны сканы выбранных срезов при одинаковом увеличении (1:1). Препараты оцифровывали на сканере Canon Pixma MG 25405 (Canon, Япония) с разрешением 600 dpi. На сканах срезов обводили границы ХЯ и Ск в одном из полушарий (рис. 1) и проводили измерение выделен-

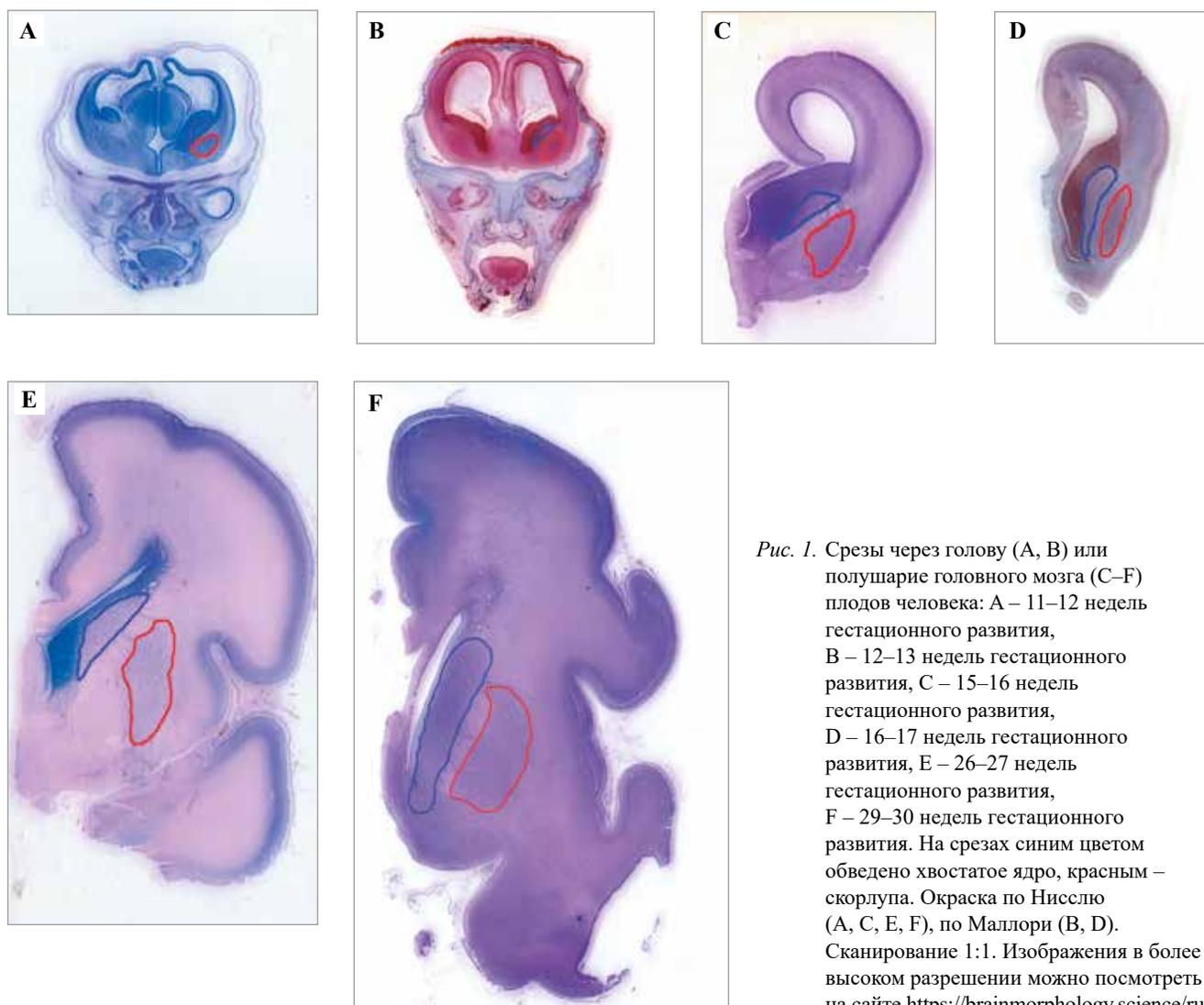


Рис. 1. Срезы через голову (А, В) или полушарие головного мозга (С–F) плодов человека: А – 11–12 недель гестационного развития, В – 12–13 недель гестационного развития, С – 15–16 недель гестационного развития, D – 16–17 недель гестационного развития, E – 26–27 недель гестационного развития, F – 29–30 недель гестационного развития. На срезах синим цветом обведено хвостатое ядро, красным – скорлупа. Окраска по Нисслю (А, С, E, F), по Маллори (В, D). Сканирование 1:1. Изображения в более высоком разрешении можно посмотреть на сайте <https://brainmorphology.science/ru/>

Fig. 1. Cross-sectional views of the head (A, B) and cerebral hemisphere (C–F) of human fetuses (in the weeks of gestational development): A – 11–12, B – 12–13, C – 15–16, D – 16–17, E – 26–27, F – 29–30. The caudate nucleus is highlighted in blue, while the putamen is marked in red. Nissl staining (A, C, E, F), Mallory stain (B, D). Scanning: 1:1. High-resolution section images are available for viewing at <https://brainmorphology.science/>

ной площади при помощи программы ImageJ (v.1.54f, НИИ, США).

Объемы были рассчитаны, исходя из толщины срезов, числа срезов, содержащих ХЯ и Ск, и площади, занимаемой этими структурами на срезе, по формуле:

$$V = \Sigma Sn \times m \times d,$$

где V – объем структуры, ΣSn – сумма площадей измеренных срезов, m – число, указывающее, с каким интервалом были взяты срезы (например, каждый 25-й), d – толщина срезов.

Результаты

Объем ХЯ и Ск плодов человека на сроке от 11 до 30 недель гр представлен в таблице.

На сроке 11–12 недель гр на гистологических срезах даже при небольшом увеличении можно выявить

головку ХЯ в области вентрального прогиба возвышений латеральных желудочков (ганглиозных бугорков) в виде достаточно плотного скопления нейробластов (однако более разреженных, чем в ганглиозных бугорках). Ск отделена от ХЯ внутренней капсулой и четко выделяется на гистологических срезах (рис. 1 А).

На 12–13-й неделе гр головка ХЯ увеличивается в размерах, в то время как его хвост еще недостаточно выражен. В Ск появляются признаки разделения на островки (с более плотной группировкой нейробластов) и окружающий их матрикс. Объем ХЯ вырастает в 3 раза, а скорлупы в 4 раза по сравнению с 11–12 неделями гр.

На 14–17-й неделе процессы роста и развития ХЯ и Ск продолжают: в ХЯ становится возможным выделить хвостовую часть, в Ск разделение на островки и матрикс становится еще более выраженным. Объем

Объем хвостатого ядра и скорлупы на разных сроках фетального развития человека | The caudate nucleus and putamen volumes at different stages of human fetal development

№	Рост, мм Height, mm	Возраст, недель гестационного развития Age, gestational weeks	Объем хвостатого ядра, мм ³ Caudate nucleus volume, mm ³	Объем скорлупы, мм ³ Putamen volume, mm ³	Общий объем неостриатума, мм ³ Total Neostriatum volume, mm ³
1	ТКД 48 CRL 48	11–12	0,99	2,07	3,06
2	ТКД 60 CRL 60	12–13	3,25	8,48	11,73
3	ТКД 90 CRL 90	14–15	9,21	19,42	28,63
4	Нет данных Not available	15–16	9,55	21,02	30,57
5	ТКД 115 CRL 115	16–17	15,22	37,02	52,24
6	230	20–21	104,31	98,29	202,6
7	310	26–27	102,36	169	271,36
8	390	29–30	399,27	551,51	950,78

ТКД – теменно-копчиковая длина | CRL – crown-rump length

ХЯ возрастает в 5 раз, а Ск в 4 раза по сравнению с 12–13-й неделей гр. К 20-й неделе объем ХЯ возрастает еще примерно в 7 раз, а Ск в 2,5 раза. Таким образом, на сроке с 10-й по 20-ю неделю гр объем ХЯ вырастает более чем в 100 раз, Ск примерно в 36 раз, а общий объем неостриатума в 66 раз.

С 21-й по 30-ю неделю гр нейроны неостриатума, смешанные с многочисленными нейробластами, остаются по-прежнему незрелыми и имеют относительно крупное клеточное ядро и небольшое количество цитоплазмы. Тельца Ниссля едва заметны. Объем ХЯ возрастает с 20-й по 30-ю неделю гр еще в 4 раза, а Ск в 5 раз.

Обсуждение

Процессы клеточной миграции начинаются в области неостриатума человека на 14-й стадии развития по Карнеги (ТКД 5–7 мм, 7-я неделя гр) [7]. К сожалению, развитие этой области у человека еще недостаточно хорошо изучено по сравнению с грызунами.

Детальный анализ временного градиента происхождения клеток неостриатума крысы был проведен в 1990-х годах. Однако прямое сравнение развития этой области у грызунов и человека невозможно: у крыс ХЯ и Ск образуют единый комплекс (так называемый каудатопутамен), в то время как у человека эти структуры разделены. Впрочем, считается, что основные паттерны их развития можно сопоставить. ХЯ и прекоммиссуральную часть Ск у человека можно соотнести с дорсолатеральной частью комплекса ХЯ и Ск крысы, а посткоммиссуральную часть Ск человека с вентролатеральной частью комплекса у грызунов. У крыс вентролатеральная часть развивается несколько раньше, чем дорсолатеральная, но с некоторым пересечением во времени. У человека зачаток Ск образуется из лате-

рального возвышения желудочков (латерального ганглиозного бугорка) на сроке между 18-й (конец 9-й недели гр) и 21-й стадиями по Карнеги, а развитие ХЯ несколько запаздывает и происходит на сроке между 19-й (начало 10-й недели гр) и 23-й стадиями [10, 11]. Сейчас эта концепция дополняется с учетом данных геноархитектоники [2]. Тем не менее к концу эмбрионального периода у человека ХЯ и Ск уже хорошо выявляются [7].

В нашей работе эмбриональный период развития не изучался. Однако и на самых ранних этапах плодного развития, на 11–12-й неделе гр, ХЯ и Ск уже хорошо идентифицировались, при этом Ск была лучше выражена на срезах.

При примененном нами способе сканирования на цифровых изображениях выходит получить разрешение, при котором в 1 мм содержится 23,6 пикселя, тогда как на МРТ-сканах разрешение обычно не превышает 1 пиксель на 1 мм. При помощи МРТ головку ХЯ и Ск удастся выявить в виде плохо очерченной области со значительно сниженной интенсивностью сигнала с 14–15-й недели гр. На сроке 15–22 недель головка ХЯ увеличивается в размерах. На МРТ-сканах она хорошо выявляется на уровне межжелудочкового отверстия, в то время как хвост ХЯ сливается с внутренней капсулой [5]. На гистологических препаратах хвост ХЯ можно выявить даже при прямом сканировании, как это было сделано в нашей работе.

T. Takakuwa et al. [5] установили, что объем ХЯ и Ск на сроке от 10 до 20 недель гр линейно увеличивается. Полученные нами на гистологическом материале данные очень хорошо согласуются с данными этой группы авторов, несмотря на то, что они использовали МРТ-сканирование. По всей видимости, такое совпадение

результатов может быть связано с высокой плотностью расположения нейробластов в неостриатуме, что нивелирует артефакты, связанные с обезвоживанием и, как следствие, неравномерным сжатием образцов мозга во время гистологической проводки. С другой стороны, данные, полученные при помощи неинвазивных методов, могут быть недостаточно полными из-за низкого разрешения и отсутствия цитоархитектонического контроля. Ранее нами уже было показано, что результаты морфометрических измерений на гистологических препаратах коллекции хорошо согласуются с источниками литературы [12]. В новом исследовании результаты хорошо совпадали как с данными, полученными другими авторами с использованием гистологических методов [13], так и с помощью МРТ. Однако число работ по изучению пренатального развития неостриатума (и, соответственно, число исследованных образцов) крайне невелико, и требуется как дальнейшее морфометрическое изучение его роста, так и сопоставление классических гистологических и неинвазивных методов визуализации на более обширном материале для учета влияния артефактов фиксации и проводки. Перспективна в этом плане верификация результатов, полученных разными методами на одном и том же плоде. Особенно важными эти исследования становятся в свете определения пределов изменчивости (пластичности) неостриатума.

Одним из способов нивелировать влияние артефактов гистологической проводки является исследование не абсолютных, а относительных величин. В нашем исследовании показано, что объем ХЯ с 11-й по 20-ю неделю возрастает более чем в 100 раз, а с 20-й по 30-ю неделю гр дополнительно в 4 раза, то есть суммарно с 10-й по 30-ю неделю в 400 раз. Объем Ск возрастает на соответствующих сроках в 36 и 5 раз (суммарно в 180 раз). По данным литературы, к рождению суммарный объем неостриатума может достигать 1500 мм³ [14]. Таким образом с 30-й по 40-ю неделю темпы роста неостриатума несколько снижаются, при этом неостриатум увеличивается только в 1,5 раза.

У взрослых людей средние варианты (определенные гистологически) объема ХЯ достигают 3089–3920 мм³, а Ск 3280–3827 мм³. Крайние варианты объема ХЯ могут различаться у взрослых людей более чем в 2 раза, а Ск в 3,7 раза [15]. Интересно, что и у взрослых людей данные по объему ХЯ и Ск хорошо согласуются с данными МРТ [16]. Кроме индивидуальной изменчивости ХЯ и Ск выявлены различия этих структур в правом и левом полушарии у одного индивидуума [14–17]. В ряде работ показаны половые и возрастные отличия [14, 16, 17].

Хотя в нашем исследовании было использовано малое количество образцов для каждого срока, что не позволяет учитывать индивидуальную и половую изменчивость, а также межполушарную асимметрию, увеличение объема неостриатума в пренатальном развитии очевидно перекрывает как эти различия, так

и разницу объема, вызванную использованием при измерении разных методов. По всей видимости, объем структур неостриатума может быть использован в качестве дополнительного критерия гестационной зрелости при определении возраста плода. Кроме этого, проведение морфометрического анализа внутриутробного развития мозга плода человека важно для оценки нормального роста. В последнее время появились данные о вовлечении структур неостриатума в патогенез аутизма и шизофрении [18]. Считается, что объем ХЯ увеличивается при расстройствах аутистического спектра и связан с ограниченным и повторяющимся поведением. Тем не менее динамика объема ХЯ при таком поведении у маленьких детей остается неизученной.

Заключение

Быстрые темпы нейрогенеза неостриатума во время пренатального развития человека указывают на первостепенную важность формирования моторных функций. Накопление данных о нормальном развитии хвостатого ядра и скорлупы может способствовать ранней диагностике двигательных расстройств. Это также внесет вклад в развитие новой тенденции в науках, связанных с пренатальным развитием человека, по переносу результатов исследований *ex vivo* на исследования *in vivo* с использованием неинвазивных технологий. Для преодоления разрыва между данными, полученными разными методами, мы создаем Атлас развития мозга человека. С частью образцов, описанных в нашем исследовании, можно ознакомиться на специальном сайте проекта <https://brainmorphology.science.ru/>. Дополнительное значение эти данные приобретают в связи с развитием новой области медицины – внутриутробной хирургии плода.

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования – С.В. Савельев, А.Е. Прошина, А.С. Харламова, О.С. Годовалова.
Сбор и обработка материала – О.С. Годовалова, А.С. Харламова, Ю.С. Кривова, А.Е. Прошина, Е.О. Грушецкая, Д.А. Отлыга, Е.Г. Отлыга, Г.А. Сонин.
Анализ данных – А.С. Прошина, А.С. Харламова, О.С. Годовалова, Е.О. Грушецкая.
Написание текста – А.Е. Прошина, Ю.С. Кривова, Е.О. Грушецкая.
Редактирование – А.Е. Прошина, Е.О. Грушецкая, О.С. Годовалова, А.С. Харламова, Ю.С. Кривова, Д.А. Отлыга, Е.Г. Отлыга, Г.А. Сонин, С.В. Савельев.

Author contribution

Conceived the study and designed the experiment – S.V. Saveliev, A.E. Proshchina, A.S. Kharlamova, O.S. Godovalova.
Collected the data – O.S. Godovalova, A.S. Kharlamova, Yu.S. Krivova, A.E. Proshchina, E.O. Grushetskaya, D.A. Otlyga, E.G. Otlyga, G.A. Sonin.
Performed the analysis – A.E. Proshchina, A.S. Kharlamova, O.S. Godovalova, E.O. Grushetskaya.
Wrote the paper – A.E. Proshchina, Yu.S. Krivova, E.O. Grushetskaya.
Edited the manuscript – A.E. Proshchina, E.O. Grushetskaya, O.S. Godovalova, A.S. Kharlamova, Yu.S. Krivova, D.A. Otlyga, E.G. Otlyga, G.A. Sonin, S.V. Saveliev.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure. The authors declare no conflict of interest.

Благодарность. Авторы выражают признательность всем сотрудникам лаборатории развития нервной системы, которые участвовали в создании коллекции.

Acknowledgment. The authors would like to express their gratitude to all the staff members of the Laboratory of Nervous System Development who contributed to the creation of this collection.

Литература/References

1. Yanagisawa N. Functions and dysfunctions of the basal ganglia in humans. *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci.* 2018;94(7):275–304. DOI: 10.2183/pjab.94.019.
2. Del Rey NL, García-Cabezas MÁ. Cytology, architecture, development, and connections of the primate striatum: hints for human pathology. *Neurobiol Dis.* 2023;176:105945. DOI: 10.1016/j.nbd.2022.105945.
3. Vuksić M, Rados M, Kostović I. Structural basis of developmental plasticity in the corticostriatal system. *Coll Antropol.* 2008;32 Suppl 1:155–9. PMID: 18405076.
4. Kostović I, Džaja D, Raguž M, Kopic J, Blažević A, Krsnik Ž. Transient compartmentalization and accelerated volume growth coincide with the expected development of cortical afferents in the human neostriatum. *Cereb Cortex.* 2022;33(2):434–57. DOI: 10.1093/cercor/bhac076.
5. Takakuwa T, Shiraishi N, Terashima M, Yamanaka M, Okamoto I, Imai H et al. Morphology and morphometry of the human early foetal brain: a three-dimensional analysis. *J Anat.* 2021;239(2):498–516. DOI: 10.1111/joa.13433.
6. Boitor-Borza D, Kovacs T, Stamatian F. Ganglionic eminence within the early developed brain visualized by 3D transvaginal ultrasound. *Med Ultrason.* 2015;17(3):289–94. DOI: 10.11152/nu.2013.2066.173.rbb.
7. Altmann R, Rechberger T, Altmann C, Hirtler L, Scharnreiter I, Stelzl P et al. Development of the prosencephalic structures, ganglionic eminence, basal ganglia and thalamus at 11+3 to 13+6 gestational weeks on 3D transvaginal ultrasound including normative data. *Brain Struct Funct.* 2023;228(9):2089–101. DOI: 10.1007/s00429-023-02679-y.
8. Proshchina A, Kharlamova A, Krivova Y, Godovalova O, Otyga D, Gulimova V et al. Neuromorphological Atlas of Human Prenatal Brain Development: white paper. *Life (Basel).* 2023;13(5):1182. DOI: 10.3390/life13051182.
9. Gilbert-Barnes E, Spicer DE, Steffensen TS. Pediatric autopsy: fetus, newborn, and child. In: E Gilbert-Barnes, DE Spicer, TS Steffensen (eds.). *Handbook of pediatric autopsy pathology.* 2nd ed. New York: Springer, 2014. P. 7–83. DOI: 10.1007/978-1-4614-6711-3_2.
10. Hamasaki T, Goto S, Nishikawa S, Ushio Y. Neuronal cell migration for the developmental formation of the mammalian striatum. *Brain Res Brain Res Rev.* 2003;41(1):1–12. DOI: 10.1016/s0165-0173(02)00216-3.
11. Freeman TB, Sanberg PR, Isacson O. Development of the human striatum: implications for fetal striatal transplantation in the treatment of Huntington's disease. *Cell Transplant.* 1995;4(6):539–45. DOI: 10.1177/096368979500400604.
12. Прощина А.Е., Харламова А.С., Кривова Ю.С., Годовалова О.С., Савельев С.В. Формирование транзиторных зон в дорсомедиальной и дорсолатеральной неокортикальных областях в раннем развитии человека. *Клиническая и экспериментальная морфология.* 2024;13(3):34–41. DOI: 10.31088/CEM2024.13.3.34-41. Proshchina AE, Kharlamova AS, Krivova YuS, Godovalova OS, Savelyev SV. Delineation of transient zones in dorsolateral and dorsomedial neocortical areas in early human development. *Clinical and experimental morphology.* 2024;13(3):34–41 (In Russ.). DOI: 10.31088/CEM2024.13.3.34-41.
13. Nakae Y, Goto N, Nara T. Development of the human putamen: a morphometric study. *Acta Anat (Basel).* 1990;137(3):272–7. DOI: 10.1159/000146831.
14. Murphy GM Jr. The human corpus striatum and dentate nucleus: volumetric analysis for hemispheric asymmetries, sex differences, and aging changes. *Exp Neurol.* 1985;89(1):134–45. DOI: 10.1016/0014-4886(85)90271-7.
15. Зворыкин В.П. Вариабельность размеров неостриатума у людей разного пола и возраста. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 1982;82(8):54–57. PMID: 7136380. Zvorykin VP. Variability of the size of the neostriatum in persons of different sexes and ages. *Zhurnal Nevrologii i Psikhiiatrii imeni S.S. Korsakova = S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 1982;82(8):54–57 (In Russ.). PMID: 7136380.
16. Gunning-Dixon FM, Head D, McQuain J, Acker JD, Raz N. Differential aging of the human striatum: a prospective MR imaging study. *AJNR Am J Neuroradiol.* 1998;19(8):1501–7. PMID: 9763385.
17. Abedelahi A, Hasanzadeh H, Hadizadeh H, Joghataie MT. Morphometric and volumetric study of caudate and putamen nuclei in normal individuals by MRI: effect of normal aging, gender and hemispheric differences. *Pol J Radiol.* 2013;78(3):7–14. DOI: 10.12659/PJR.889364.
18. Qiu T, Chang C, Li Y, Qian L, Xiao CY, Xiao T et al. Two years changes in the development of caudate nucleus are involved in restricted repetitive behaviors in 2-5-year-old children with autism spectrum disorder. *Dev Cogn Neurosci.* 2016;19:137–43. DOI: 10.1016/j.dcn.2016.02.010.

Информация об авторах

Александра Евгеньевна Прощина – доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории развития нервной системы НИИ морфологии человека им. акад. А.П. Авцына РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского.

Евгения Олеговна Грушецкая – лаборант-исследователь лаборатории развития нервной системы НИИ морфологии человека им. акад. А.П. Авцына РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского.

Ольга Сергеевна Годовалова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории развития нервной системы НИИ морфологии человека им. акад. А.П. Авцына РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского.

Анастасия Сергеевна Харламова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории развития нервной системы НИИ морфологии человека им. акад. А.П. Авцына РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского.

Юлия Сергеевна Кривова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории развития нервной системы НИИ морфологии человека им. акад. А.П. Авцына РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского.

Дмитрий Александрович Отлыга – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории развития нервной системы НИИ морфологии человека им. акад. А.П. Авцына РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского.

Екатерина Глебовна Отлыга – научный сотрудник лаборатории развития нервной системы НИИ морфологии человека им. акад. А.П. Авцына РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского.

Глеб Александрович Сонин – лаборант-исследователь лаборатории развития нервной системы НИИ морфологии человека им. акад. А.П. Авцына РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского.

Сергей Вячеславович Савельев – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией развития нервной системы НИИ морфологии человека им. акад. А.П. Авцына РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского.

Author information

Alexandra E. Proshchina – Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Nervous System Development, Avtsyn Research Institute of Human Morphology of FSBSI “Petrovsky National Research Centre of Surgery”.
<https://orcid.org/0000-0002-0515-8275>

Evgenia O. Grushetskaya – Laboratory Assistant, Laboratory of Nervous System Development, Avtsyn Research Institute of Human Morphology of FSBSI “Petrovsky National Research Centre of Surgery”.
<https://orcid.org/0009-0005-9196-4888>

Olga S. Godovalova – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Nervous System Development, Avtsyn Research Institute of Human Morphology of FSBSI “Petrovsky National Research Centre of Surgery”.
<https://orcid.org/0000-0002-9285-7241>

Anastasia S. Kharlamova – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Nervous System Development, Avtsyn Research Institute of Human Morphology of FSBSI “Petrovsky National Research Centre of Surgery”.
<https://orcid.org/0000-0003-1163-4132>

Yuliya S. Krivova – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Nervous System Development, Avtsyn Research Institute of Human Morphology of FSBSI “Petrovsky National Research Centre of Surgery”.
<https://orcid.org/0000-0001-9692-3616>

Dmitry A. Otylga – Cand. Sci. (Med.), Senior Researcher, Laboratory of Nervous System Development, Avtsyn Research Institute of Human Morphology of FSBSI “Petrovsky National Research Centre of Surgery”.
<https://orcid.org/0000-0002-6719-3383>

Ekaterina G. Otylga – Researcher, Laboratory of Nervous System Development, Avtsyn Research Institute of Human Morphology of FSBSI “Petrovsky National Research Centre of Surgery”.
<https://orcid.org/0000-0002-7943-7760>

Gleb A. Sonin – Laboratory Assistant, Laboratory of Nervous System Development, Avtsyn Research Institute of Human Morphology of FSBSI “Petrovsky National Research Centre of Surgery”.
<https://orcid.org/0000-0001-6844-700X>

Sergey V. Saveliev – Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of Laboratory of Nervous System Development, Avtsyn Research Institute of Human Morphology of FSBSI “Petrovsky National Research Centre of Surgery”.
<https://orcid.org/0000-0002-1447-7198>