

Научная статья

УДК 576.311:611.018.83:611.314
doi:10.18499/2225-7357-2024-13-4-75-81
1.5.22 – клеточная биология



Нейропластичность и содержание структурных элементов в аксоплазме тройничного нерва в процессе прорезывания постоянных зубов у человека

Н. Н. Чучкова^{1✉}, О. Л. Полякова², М. В. Сметанина¹,
К. А. Пазиненко¹, В. М. Чучков³

¹Ижевская государственная медицинская академия, Ижевск, Россия

²Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Россия

³Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

Аннотация. Цель исследования – выявить особенности количественного становления аксоплазматических органелл с преимущественным анализом составных частей цитоскелета аксонов (микротрубочек и нейрофиламентов) миелиновых и безмиелиновых нервных волокон в пульпе зубов при прорезывании постоянных зубов у человека. **Материал и методы.** Исследовали сосудисто-нервный пучок пульпы зубов у детей в возрасте 5, 10 и 14 лет. На ультрамикротографиях срезов пульпы при увеличении $\times 40000$ измеряли диаметры миелиновых и безмиелиновых проводников; на 1 мкм^2 аксоплазмы нервных проводников подсчитывали плотность расположения аксоплазматических органелл, количество микротрубочек и нейрофиламентов. Достоверность различий между группами оценивалась при помощи многофакторного дисперсионного анализа (MANOVA), значимость средних величин – по тесту Тьюки, корреляционный анализ проводился с помощью критерия Пирсона. **Результаты.** Процесс прорезывания постоянных зубов сопровождался плавным увеличением количества органелл, приходящихся на единицу площади поперечного сечения нерва независимо от его характеристик (миелиновый или безмиелиновый тип волокна). Наибольшая плотность расположения органелл отмечалась в волокнах большого диаметра как миелиновых, так и безмиелиновых проводников на всем протяжении указанного периода онтогенетического развития. Наличие миелина в оболочке нерва положительно коррелирует с насыщенностью микротрубочками в волокнах большого ($r=0,267, p=0,001$) и малого ($r=0,314, p=0,000$) диаметров, и отрицательно – в волокнах со средним диаметром ($r=-0,246, p=0,002$). Доля нейрофиламентов, представленная среди аксоплазматических органелл нейроплазмы в целом, была особенно велика в миелиновых и безмиелиновых нервных волокнах малого диаметра, составляя в среднем до 70%. Наличие миелиновой оболочки и диаметр волокна не связаны с плотностью расположения нейрофиламентов за исключением волокон среднего диаметра ($r=0,195, p=0,001$). **Заключение.** Процесс прорезывания постоянных зубов сопровождается увеличением числа органелл, элементов цитоскелета в аксоплазме нервных волокон, иннервирующих пульпу зуба, обеспечивающих морфологический субстрат нейропластичности, что необходимо учитывать, в процессе дентальной имплантации и протезирования зубов.

Ключевые слова: прорезывание постоянных зубов, пульпо-дентинный комплекс, миелиновые волокна, безмиелиновые волокна, нейрофиламенты, микротрубочки, органеллы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чучкова Н.Н., Полякова О.Л., Сметанина М.В., Пазиненко К.А., Чучков В.М. Нейропластичность и содержание структурных элементов в аксоплазме тройничного нерва в процессе прорезывания постоянных зубов у человека // Журнал анатомии и гистопатологии. 2024. Т. 13, №4. С. 75–81. <https://doi.org/10.18499/2225-7357-2024-13-4-75-81>

Original article

Neuroplasticity and Content of Structural Elements in the Axoplasm of the Trigeminal Nerve During the Eruption of Permanent Teeth in Humans

N. N. Chuchkova¹✉, O. L. Polyakova², M. V. Smetanina¹,
K. A. Pazinenko¹, V. M. Chuchkov³

¹Izhevsk State Medical Academy, Izhevsk, Russia

²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

³Udmurt State University, Izhevsk, Russia

Abstract. The aim of the presented study was to identify the features of the quantitative formation of axoplasmic organelles with a primary analysis of the components of the axonal cytoskeleton (microtubules and neurofilaments) of myelinated and non-myelinated nerve fibers in the dental pulp during the eruption of permanent teeth in humans. **Material and methods.** The neurovascular bundle of dental pulp was studied in children aged 5, 10 and 14 years. On ultramicrographs of pulp sections at a magnification of $\times 40000$, the diameters of myelin and non-myelin conductors were measured; per $1 \mu\text{m}^2$ of axoplasm of nerve conductors, the density of axoplasmic organelles, the number of microtubules and neurofilaments were calculated. The reliability of differences between groups was assessed using multivariate analysis of variance (MANOVA), the significance of average values was assessed using the Tukey test, correlation analysis was carried out using the Pearson criterion. **Results.** The process of eruption of permanent teeth was accompanied by a gradual increase in the number of organelles per unit cross-sectional area of the nerve, regardless of its characteristics (myelinated or non-myelinated fiber type). The highest density of organelles was observed in large-diameter fibers of both myelinated and non-myelinated conductors throughout the indicated segment of ontogenetic development. The presence of myelin in the nerve sheath correlates positively with microtubule saturation in fibers of large ($r=0.267$, $p=0.001$) and small ($r=0.314$, $p=0.000$) diameters, and negatively in fibers with medium diameter ($r=-0.246$, $p=0.002$). The proportion of neurofilaments represented among the axoplasmic organelles of the neuroplasm as a whole was especially high in myelinated and unmyelinated nerve fibers of small diameter, averaging up to 70%. The presence of the myelin sheath and fiber diameter are not associated with neurofilament density with the exception of medium-diameter fibers ($r=0.195$, $p=0.001$). **Conclusion.** The process of eruption of permanent teeth is accompanied by an increase in the number of organelles, cytoskeletal elements in the axoplasm of nerve fibers innervating the dental pulp, providing the morphological substrate of neuroplasticity, which must be taken into account, for example, in the process of dental implantation and dental prosthetics.

Keywords: eruption of permanent teeth; pulp-dentin complex; myelinated fibers; non-myelinated fibers; neurofilaments; microtubules; organelles

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interests.

For citation: Chuchkova N.N., Polyakova O.L., Smetanina M.V., Pazinenko K.A., Chuchkov V.M. Neuroplasticity and content of structural elements in the axoplasm of the trigeminal nerve during the eruption of permanent teeth in humans. *Journal of Anatomy and Histopathology. 2024. V. 13, №4. P. 75–81. <https://doi.org/10.18499/2225-7357-2024-13-4-75-81>*

Введение

Иннервация играет важную роль в обеспечении функций зуба, оказывает важное влияние на кровоток в пульпе, отвечает за разрешение воспаления и регенерацию пульпы и дентина. Пульпо-дентинный комплекс обеспечивается высокой плотностью свободных нервных окончаний тройничного нейрона. Эти нейрональные волокна узкоспециализированы для восприятия вредных раздражителей, таких как термические, механические, химические и биологические сигналы. Нервные волокна (НВ) в пульпе представлены проводниками миелинового типа, которые иннервируют преимущественно дентин зуба и безмиелиновыми НВ, которые обеспечивают иннервацию тела пульпы и кровеносные сосуды. Они характерны для человека и животных и описаны в ряде обзоров [5, 7, 15]. Морфология нервных волокон пульпы зуба человека изменяется по мере их внутрипульпарного прохождения: проникая через апикальное отверстие зуба около 40% миелинизирован-

ных волокон апикальной корневой пульпы становятся немиелинизированными в коронковой пульпе, и практически все оставшиеся волокна являются немиелинизированными в периферической пульпе [10, 13, 17]. Морфологический субстрат нейропластичности основан на обеспеченности НВ ультраструктурными компонентами нейроплазмы. Особое внимание в последнее время уделяется аксональному цитоскелету (микротрубочкам и нейрофиламентам), который активно подвергается внешнему влиянию и способствует повреждению и/или дегенерации аксонов в процессе развития [9]. Формированию нервного аппарата молочных зубов в научной литературе посвящено достаточно исследований, в т.ч. последних лет [12, 21], но аналогичные исследования при прорезывании постоянных зубов у человека отсутствуют. Характеристика нервных волокон при прорезывании постоянных зубов может способствовать лучшей интерпретации болевых симптомов, но практически остается неизученной. В связи с этим, целью нашего исследования являлось выявление

особенностей количественного становления аксоплазматических органелл, с преимущественным анализом составных частей цитоскелета аксонов (микротрубочек и нейрофиламентов) миелиновых (МВ) и безмиелиновых нервных волокон (БМВ) в пульпе зубов при прорезывании постоянных зубов у человека.

Материал и методы исследования

Материалом для гистологического исследования стал сосудисто-нервный пучок пульпы зубов, экстренно удаленных по медицинским показаниям в результате травмы, у детей и подростков 5, 10 и 14 лет, обоего пола, родившихся и постоянно проживающих на территории Удмуртии. При осмотре полости рта обследуемого ребенка отмечалось анатомическое и физиологическое состояние зубов. В качестве респондентов отбирали здоровых детей без соматической и стоматологической патологии, выявляемых при непосредственном осмотре и сборе анамнестических данных, а также не имеющих генетических отклонений в развитии зубов, что выяснялось в ходе генеалогического анализа данных, полученных от родителей ребенка, без наличия гнойно-воспалительных процессов. Данные фиксировали в карте, определяющей уровень стоматологического статуса.

Возраст оценивался согласно схеме возрастной периодизации, принятой на VII Всесоюзной научной конференции по возрастной морфологии, физиологии и биохимии АПН СССР в Москве (1965). Научные исследования одобрены Комитетом по биомедицинской этике ФГБОУ ВО «Ижевская государственная медицинская академия» Минздрава России (апликационный №391 от 05.11.2013 г.). Взятие материала проводилось с добровольного письменного согласия ребенка и его родителей (представителей).

В каждой возрастной группе исследовали материал 8 удаленных зубов (по четыре от мальчиков и от девочек). После технической обработки зуб распиливали, извлеченную пульпу подготавливали для электронно-микроскопического исследования. Для этого ее фиксировали в 2,5% глутаральдегиде с дофиксацией по методике G. Millonig (1962), заключали в смесь смол эпон-аралдит. Материал контрастировали осмием в процессе заливки, ультратонкие срезы – уранилацетатом и свинцом. Ультратонкие срезы изучали при увеличении $\times 40000$ в электронном микроскопе «HU-7A» (Hitachi, Japan). На микрофотографиях при помощи морфометрических программ Image ProInsite 8.0, Image ProPlus 6.0 (MediaCybernetics) измеряли диаметры миелиновых и безмиелиновых проводников и распределяли их на три группы. Волокна большого диаметра (БД) – более 0,6 мкм, среднего диаметра (СД) – 0,21–0,6 мкм и малого диаметра (МД) – 0,2 мкм и меньше. В аксо-

плазме НВ на единице площади в 1 мкм^2 подсчитывали плотность расположения аксоплазматических органелл (количество микротрубочек, нейрофиламентов, митохондрий, мультивезикулярных телец, мембран ЭПС); отдельно подсчитывали количество микротрубочек (МТ) и нейрофиламентов (НФ). В работе использовался статистический метод с применением программ «Statistica 10.0», определением средних арифметических значений (M) и стандартного отклонения (σ). Предварительно данные были проверены на нормальность распределения с помощью критерия Шапиро–Уилка. Достоверность различий между группами оценивалась при помощи многофакторного дисперсионного анализа (MANOVA), значимость определений средних величин оценивалась по тесту Тьюки, корреляционный анализ проводился с помощью критерия Пирсона. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

В аксоплазме тройничного нерва, как и других нервных проводников, располагались структурные элементы, включающие МТ, НФ, митохондрии, везикулярные и мультивезикулярные тельца, мембраны ЭПС, плотность расположения которых неодинакова и зависит главным образом, от диаметра волокна. Плотность расположения органелл, приходящихся на 1 мкм^2 аксоплазмы миелиновых и безмиелиновых нервов пульпы прорезавшегося зуба, представлена в табл. 1.

Наблюдалась статистически значимые различия в количестве анализируемых элементов аксоплазмы в зависимости от возраста: $F(18,128) = 297,884$ $p < 0,0001$; след Пиллаи = 1,911. Возраст оказывал статистически значимое влияние на количество органелл в нервных волокнах БД: $F(2,75) = 840,249$ $p < 0,0001$; СД – $F(2,75) = 965,960$ $p < 0,0001$; МД – $F(2,75) = 819,236$ $p < 0,0001$.

Процесс прорезывания постоянных зубов (ПЗ), начавшийся в возрасте 5 лет и закончившийся в подростковом возрасте (14 лет), сопровождался плавным увеличением количества органелл, приходящихся на единицу площади поперечного сечения нерва независимо от его степени миелинизации (миелиновый или безмиелиновый тип НВ). Наибольшая плотность расположения органелл отмечалась в волокнах большого диаметра как миелиновых, так и безмиелиновых проводников на всем протяжении указанного отрезка онтогенетического развития. Максимальный прирост числа элементов в аксоплазме к окончанию прорезывания в 14-летнем возрасте был отмечен в МВ БД – на 15,4%, в БМВ МД – на 18,4%.

В аксоплазме безмиелиновых НВ в большом количестве определялись микротрубочки, они располагались упорядоченно и

Таблица 1/ Table 1

Плотность расположения аксоплазматических органелл (шт/мкм²) в волокнах пульпы в процессе прорезывания постоянных зубов (5–14 лет), М±σ
Density of arrangement of axoplasmic organelles (pcs/μm²) in pulp fibers during the eruption of permanent teeth (5–14 years), M±σ

Возраст	Нервные волокна					
	Миелиновые			Безмиелиновые		
	БД	СД	МД	БД	СД	МД
5 лет	187,44±4,51	155,20±3,11 [∇]	159,68±2,97 [∇]	193,4±1,33	154,94±1,44 [∇]	160,0±3,11 [∇]
10 лет	198,60±2,14*	167,65±1,89 [∇]	181,88±1,76* [∇]	209,11±1,23*	165,85±1,33 [∇]	173,8±1,89* [∇]
14 лет	221,80±1,58*,**	182,80±1,26 ^{∇,*,**}	183,0±1,98 ^{∇,**}	221,3±1,20*	186,28±1,25 ^{∇,**}	196,30±1,05 ^{∇,**}
Прирост (%)	15,4	15,1	12,7	12,6	17,0	18,4

Примечание: БД – волокна большого диаметра (>0,6 мкм), СД – волокна среднего диаметра (0,21–0,6 мкм), МД – волокна малого диаметра (≤0,2 мкм); * – различия статистически значимы для миелиновых либо безмиелиновых волокон одного диаметра в возрасте 5–10, 10–14 лет, ** – различия статистически значимы между возрастом 5 и 14 лет при p=0,0001; ∇ – различия статистически значимы для миелиновых либо безмиелиновых волокон разного диаметра в пределах одной возрастной группы p<0,05.

Таблица 2/ Table 2

Плотность расположения микротрубочек в аксоплазме миелиновых и безмиелиновых волокон пульпы зуба (шт/мкм²) в процессе прорезывания постоянных зубов (5–14 лет), М±σ
The density of microtubules in the axoplasm of myelinated and non-myelinated fibers of the dental pulp (pcs/μm²) during the eruption of permanent teeth (5–14 years), M±σ

Возраст	Нервные волокна					
	Миелиновые			Безмиелиновые		
	БД	СД	МД	БД	СД	МД
5	33,72±1,7	45,88±1,13 [∇]	58,92±1,38 [∇]	36,32±1,15	44,08±1,22 [∇]	60,01±1,38 [∇]
Доля МТ в составе органелл (%)	17,9	29,5	36,9	18,8	28,4	37,5
10	37,52±2,29*	51,32±1,38 ^{∇,*}	62,28±1,43 ^{∇,*}	41,9±1,7*	47,72±1,24*	64,95±1,61 ^{∇,*}
14	47,76±1,89* ^{**}	57,23±2,51 ^{∇,***}	65,48±1,61 ^{∇,***}	51,5±1,7* ^{**}	55,24±1,44* ^{**}	69,38±2,01 ^{∇,***}
Доля МТ в составе органелл (%)	21,6	31,4	35,8	23,3	29,6	35,4

Примечание: МТ – микротрубочки, БД – волокна большого диаметра (>0,6 мкм), СД – волокна среднего диаметра (0,21–0,6 мкм), МД – волокна малого диаметра (≤0,2 мкм); * – различия статистически значимы для миелиновых либо безмиелиновых волокон одного диаметра в возрасте 5–10, 10–14 лет, ** – различия статистически значимы между возрастом 5 и 14 лет при p=0,0001; ∇ – различия статистически значимы для миелиновых либо безмиелиновых волокон разного диаметра в пределах одной возрастной группы p<0,05.

равномерно, по типу «кристаллической решетки». Эта особенность пространственного расположения отличала их от миелиновых проводников.

МТ жизненно важны для структуры, роста, транспорта органелл и белков, а также расширения и организации растущих аксонов во время развития [22]. Насыщенность МТ и НФ аксоплазматических отростков нейронов тройничного нерва в пульпе зуба в процессе прорезывания зубов представлена в табл. 2 и 3.

Количество МТ, приходившихся на единицу аксоплазмы нерва, плавно увеличивалось с возрастом в МВ и БМВ разного диаметра и миелинизации. Показаны достоверные различия между количеством МТ в НВ разного диаметра и возрастом при p=0,0001. Мы выявили, что наибольший процентный прирост числа МТ к 14-летнему возрасту был ха-

рактерен для волокон БД (41,8% – для МВ и 41,9% – для БМВ) и наименьший – для волокон МД (11,2% – для МВ и 15,5% – для БМВ). Количество МТ в составе аксоплазматических органелл обнаружило обратную пропорциональную зависимость: их число увеличивалось с уменьшением диаметра проводника. Так, если в 5-летнем возрасте в МВ БД МТ составляли 17,9% от общего числа органелл, то в волокнах МД их доля была равна 36,8%, т.е. в 2 раза выше. В БМВ ситуация аналогична: доля МТ в МВ БД составляла 18,8%, МД – 37,5%. К моменту окончания прорезывания зубов (14 лет) выявленная тенденция (преобладание доли МТ среди всего состава аксоплазматических органелл) сохранялась, хотя различия несколько сглаживались. В МВ БД доля МТ составляла 21,6%, МД – 35,8%; в БМВ – 23,3 и 35,4%, соответственно. Количество микротрубочек в НВ БД с возрастом было статистиче-

Таблица 3/ Table 3

Плотность расположения нейрофиламентов в составе аксоплазмы миелиновых и безмиелиновых волокон пульпы зуба (шт/мкм²) в процессе прорезывания постоянных зубов (5–14 лет), М±σ
Density of arrangement of neurofilaments in the composition of the axoplasm of myelinated and non-myelinated fibers of the dental pulp (pcs/μm²) during the eruption of permanent teeth (5–14 years), M±σ

Возраст	Нервные волокна					
	Миелиновые			Безмиелиновые		
	БД	СД	МД	БД	СД	МД
5	149,0±4,75	103,92±4,39 √	95,32±1,72 √	151,63±1,69	105,53±1,65 √,*	93,98±2,43 √
10	152,24±3,93 *(p=0,008)	107,88±1,92√, *(p=0,0001) *	110,04±1,37√, *(p=0,0001)	158,24±1,21* (p=0,008)	109,09±1,77 √,* (p=0,0001)	99,52±1,63√,* (p=0,0001)
14	162,72±1,84 *(p=0,0001) **(p=0,0001)	115,52±2,48√, * ** (p=0,0001)	107,32±1,84√ ,* (p=0,001) ** (p=0,0001)	158,32±1,71* (p=0,0001) ** (p=0,0001) *	120,35±1,36 √,* ** (p=0,0001)	115,53±1,96√, * (p=0,001) ** (p=0,0001)
% прироста (5→14 лет)	9,2	11,2	12,6	4,4	14,0	23,1
Доля НФ в составе органелл в 14 лет (%)	36,3	58,1	70,5	39,8	55,2	69,7

Примечания: НФ – нейрофиламенты, БД – волокна большого диаметра (>0,6 мкм), СД – волокна среднего диаметра (0,21–0,6 мкм), МД – волокна малого диаметра (≤0,2 мкм); * – различия статистически значимы для миелиновых либо безмиелиновых волокон одного диаметра в возрасте 5–10, 10–14 лет, ** – различия статистически значимы между возрастом 5 и 14 лет; √ – различия статистически значимы для миелиновых либо безмиелиновых волокон разного диаметра в пределах одной возрастной группы p<0,05.

ски значимо: F (2,75) = 334,434 p<0,0001; СД – F (2,75) = 259,055 p<0,0001; МД – F (2,75) = 123,275 p<0,0001.

Наличие миелина в оболочке нерва показало слабую положительную корреляцию с насыщенностью МТ в волокнах БД (r=0,267, p=0,001) и МД (r=0,314, p=0,000) диаметров, а в волокнах со СД был выявлен отрицательный результат (r=-0,246, p=0,002).

Не отмечено корреляционной зависимости в количестве нейрофиламентов в МВ и БМВ БД (r = 0,116, p=0,156) и МД (r=-0,058, p=0,480), но не для среднего размера волокон (r=0,195, p=0,017). Плотность расположения НФ в аксоплазме волокон представлена в табл. 3.

Возраст оказывал статистически значимое влияние на количество НФ в НВ разного диаметра: БД – F (2,75) = 93,166 p<0,0001; СД – F (2,75) = 89,313 p<0,0001; МД – F (2,75) = 508,285, p<0,0001. Количество НФ, входящих в состав органелл аксоплазмы нейронов – стабильный показатель на разных этапах прорезывания ПЗ, начиная с 5-летнего возраста и заканчивая возрастным периодом в 14 лет (окончание прорезывания ПЗ) (табл. 3). Исключение в этом отношении составляли лишь безмиелиновые проводники МД, в которых прирост НФ к моменту окончания прорезывания составлял 23,1%. Более высокая плотность НФ в НВ МД показана в ряде работ [16, 18], тогда как другие авторы [6] не отмечают никакой связи между плотностью (и целостностью) НФ и интенсивностью изменений

пульпы при формировании воспалительного инфильтрата.

Доля НФ, представленная среди аксоплазматических органелл нейроплазмы в целом была особенно велика в МВ и БМВ МД, составляя в среднем ~70% (в интервале от 64,3% в МВ в 10 лет и до 74,7% в БМВ в этом же возрасте). Этот показатель являлся стабильным в течение всего времени прорезывания зубов.

Корреляционная зависимость между возрастом, наличием миелиновой оболочки и количеством НФ и МТ представлена в табл. 4.

Проведенный анализ выявил, что в волокнах нервов, иннервирующих пульпу в процессе прорезывания зубов, существует прямая корреляционная зависимость между возрастом и плотностью расположения органелл МТ и НФ в аксоплазме нервов. Однако факт наличия миелиновой оболочки и диаметр волокна не связаны с плотностью расположения НФ (за исключением волокон среднего диаметра), тогда как количество МТ статистически значимо и положительно коррелирует с наличием миелина в оболочке нервов БД и МД, но не в нервах со СД – где эта зависимость отрицательна.

Процесс прорезывания постоянных зубов сопровождается увеличением числа органелл в аксоплазме НВ, иннервирующих пульпу зуба, что обеспечивает морфологический субстрат нейропластичности. Последняя, в свою очередь, обусловлена не только процессом развития, но и определяет возможность

Таблица 4/ Table 4

Коэффициенты корреляции между количеством элементов цитоскелета в нервных волокнах разного диаметра, возрастом и наличием миелиновой оболочки
Correlation coefficients between the number of cytoskeletal elements in nerve fibers of different diameters, age and the presence of the myelin sheath

Корреляционные пары	Нервные волокна		
	БД	СД	МД
Микротрубочки/возраст	0,901**	0,933**	0,879**
Нейрофиламенты/возраст	0,795**	0,819**	0,811**
Микротрубочки/наличие миелиновой оболочки	0,267**	-0,246**	0,314**
Нейрофиламенты/наличие миелиновой оболочки	0,116	0,195*	-0,058

Примечание: БД – волокна большого диаметра (>0,6 мкм), СД – волокна среднего диаметра (0,21–0,6 мкм), МД – волокна малого диаметра (≤0,2 мкм); ** – корреляция значима на уровне $p < 0,01$ (двухсторонняя); * – корреляция значима на уровне $p < 0,05$ (двухсторонняя).

регенерации [20], формирования боли [19], выявлена структурная пластичность миелиновой инфраструктуры нервной системы [9]. МТ и НФ составляют важную и, подчас, большую часть органелл аксоплазмы (70%), особенно в волокнах малого диаметра как миелиновых, так и безмиелиновых проводников. Увеличение компонентов цитоскелета необходимо для важнейших процессов, в т.ч. формирования нейритов, основы аксонов и дендритов, аксонального транспорта [3, 8, 15]. Нейрональный цитоскелет не статичен, при этом динамика его составляющих играет важную роль в поддержании структурной целостности нейрона. Количественный состав входящих в него органелл обусловлен как факторами внешней среды (например, техногенным загрязнением) [2], так и внутренними условиями развития (например, формированием микрососудистого русла и активностью гемодинамики) [1, 4], хотя ряд авторов [6] не выявляют какой-либо зависимости между насыщенностью нейроплазмы микрофиламентами и воспалительными изменениями пульпы. МТ и микрофиламенты нервных проводников являются аналогами их цитоплазматических элементов, участвуют в формировании нейрональной цитоархитектуры, и изменения их количества в составе цитоскелета в процессе дифференциации нейрона могут коррелировать с функцией клетки. Учитывая значимость этих органелл, в работе [11] предлагается анализ нейронной полярности не только *in vivo*, но и *in vitro*.

Заключение

Процесс прорезывания постоянных зубов сопровождается увеличением числа органелл, элементов цитоскелета в аксоплазме нервных волокон, иннервирующих пульпу зуба, обеспечивающих морфологический субстрат нейропластичности, что необходимо учитывать, например, в процессе дентальной имплантации и протезирования зубов. Информация о нервных волокнах, иннервирующих пульпу зуба, их ультрамикроскопической

организации, имеет решающее значение для понимания процессов развития, формирования пластичности в течение органогенеза, а также для обеспечения функции (понимание зубной боли и гиперчувствительности). Полученные данные в совокупности позволяют лучше оценить значение иннервации в нормальной физиологии комплекса «пульпа-дентин», ее роли в развитии и регенерации нервных проводников, что может способствовать поиску новых терапевтических возможностей с учетом динамики формирования нейро-морфологического субстрата.

Список источников / References

1. Сирак С.В., Вафияди М.Ю., Неминушчая Е.Г., Копылова И.А. Морфологические особенности кровоснабжения и иннервации пульпы зуба при кариесе эмали и дентина. Медицинский Вестник Северного Кавказа. 2018;(1.1):93–96. Sirak S.V., Vafiadi M.YU., Neminushchaya E.G., Kopylova I.A. Morfologicheskie osobennosti krovosnabzheniya i innervacii pul'py zuba pri kariese emali i dentina [Morphological features of blood supply and innervation of dental pulp in enamel and dentin caries]. Medical Bulletin of the North Caucasus. 2018;(1.1):93–96 (in Russ.).
2. Полякова О.Л., Чучков В.М., Чучкова Н.Н. Техногенное загрязнение среды сопровождается снижением плотности расположения элементов цитоскелета в миелинизированных нервных волокнах пульпы. Фундаментальные, клинические и трансляционные аспекты нейронаук: материалы IV Российской научно-практической конференции. Ижевск, 29–30 ноября 2022. Ижевск; 2022:67–71. Polyakova O.L., Chuchkov V.M., Chuchkova N.N. Tekhnogennoe zagryaznenie sredy soprovozhdetsya snizheniem plotnosti raspolozheniya elementov citoskeleta v mielinizirovannykh nervnykh voloknah pul'py. Fundamental'nye, klinicheskie i translyacionnye aspekty nejronauk: materialy IV Rossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2022 November 29–30. Izhevsk; 2022:67–71 (in Russ.).
3. Чучкова Н.Н., Полякова О.Л., Чучков В.М., Сметанина М.В. Динамика структурных компонентов аксоплазмы, транспортируемых медленным и быстрым аксональным током в

- нервных волокнах пульпы в процессе органогенеза зубов. Медицинская наука и образование Урала. 2022;1:192–194.
- Chuchkova N.N., Polyakova O.L., Chuchkov V.M., Smetanina M.V. Dinamika strukturnykh komponentov aksoplazmy, transportiruemykh medlennym i bystryim aksonal'nyim tokom v nervnykh voloknah pul'py v processe organogeneza zubov. Meditsinskaya nauka i obrazovanie Urala 2022;1:192–194 (in Russ.).
4. Чучкова Н.Н., Полякова О.Л., Шкляев А.Е., Чучков В.М., Сметанина М.В., Пазиненко К.А. Микрососудистое русло и адренергические нервные окончания пульпы в процессе прорезывания постоянных зубов. Журнал анатомии и гистопатологии. 2023,12(2):72–78.
Chuchkova N.N., Polyakova O.L., Shklyayev A.E., Chuchkov V.M., Smetanina M.V., Pazinenko K.A. Mikrososudistoe ruslo i adrenergicheskie nervnye okonchaniya pul'py v processe prorezyvaniya postoyannykh zubov. Zhurnal anatomii i gistopatologii. 2023, 12(2): 72–78 (in Russ.).
 5. Byers M.R., Calkins D.F. Trigeminal sensory nerve patterns in dentine and their responses to attrition in rat molars. Arch Oral Biol. 2021 Sep;129:105197. doi: 10.1016/j.archoralbio.2021.105197.
 6. de Arruda J.A.A., Gomes H.S., Sampaio F.C., Bruno K.F., Estrela C., Mendonça E.F. et al. Evaluation of the expression of nerve fiber markers in healthy and inflamed dental pulp. Braz Oral Res. 2023 Feb 13;37:e020. DOI: 10.1590/1807-3107bor-2023.vol37.0020.
 7. Diogenes A. Trigeminal Sensory Neurons and Pulp Regeneration. J Endod. 2020 Sep;46(9S):S71-S80. doi: 10.1016/j.joen.2020.06.038.
 8. Fenn J.D., Li Y., Julien J.P., Jung P., Brown A. The Mobility of Neurofilaments in Mature Myelinated Axons of Adult Mice. eNeuro. 2023 Mar 22;10(3):ENEURO.0029-23.2023. DOI: 10.1523/ENEURO.0029-23.2023.
 9. Gallo G. The Axonal Actin Filament Cytoskeleton: Structure, Function, and Relevance to Injury and Degeneration. Mol Neurobiol. 2024 Aug;61(8):5646-5664. DOI: 10.1007/s12035-023-03879-7.
 10. Henry M.A., Luo S., Levinson S.R. Unmyelinated nerve fibers in the human dental pulp express markers for myelinated fibers and show sodium channel accumulations. BMC Neurosci. 2012 Mar 19;13:29. DOI: 10.1186/1471-2202-13-29.
 11. Jose M. In Vitro and In Vivo Analysis of Neuronal Polarity. Methods Mol Biol. 2024;2831:113-132. DOI: 10.1007/978-1-0716-3969-6_9.
 12. Khademi M., Shekaari M.A., Parizi M.T., Poureslami H. Comparison of nerve fibers in the deciduous first and second molar teeth: an in vitro study. Eur Arch Paediatr Dent. 2021 Feb;22(1):43-48. DOI: 10.1007/s40368-020-00516-y.
 13. Kim T.H., Park S.K., Choi S.Y., Lee J.S., Bae Y.C. Morphologic Change of Parvalbumin-positive Myelinated Axons in the Human Dental Pulp. J Endod. 2017 Jun;43(6):977-981. DOI: 10.1016/j.joen.2017.01.010.
 14. Monje M. Myelin Plasticity and Nervous System Function. Annu Rev Neurosci. 2018 Jul 8;41:61-76. DOI: 10.1146/annurev-neuro-080317-061853.
 15. Mutalik S.P., Ghose A. Axonal cytomechanics in neuronal development. J Biosci. 2020;45:64.
 16. Muzio M.R., Fakoya A.O., Cascella M. Histology, Axon. 2022 Nov 14. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan
 17. Paik S.K., Lee D.S., Kim J.Y., Bae J.Y., Cho Y.S., Ahn D.K. et al. Quantitative ultrastructural analysis of the neurofilament 200-positive axons in the rat dental pulp. J Endod. 2010 Oct;36(10):1638-42. DOI: 10.1016/j.joen.2010.05.005.
 18. Paus T. Growth of white matter in the adolescent brain: myelin or axon? Brain Cogn. 2010 Feb;72(1):26-35. DOI: 10.1016/j.bandc.2009.06.002.
 19. Puretić M.B., Demarin V. Neuroplasticity mechanisms in the pathophysiology of chronic pain. Acta Clin Croat. 2012 Sep;51(3):425-9.
 20. Shen J. Plasticity of the Central Nervous System Involving Peripheral Nerve Transfer. Neural Plast. 2022 Mar 18;2022:5345269. DOI: 10.1155/2022/5345269.
 21. Suzuki K., Lovera M., Schmachtenberg O., Couve E. Axonal Degeneration in Dental Pulp Precedes Human Primary Teeth Exfoliation. J Dent Res. 2015 Oct;94(10):1446-53. DOI: 10.1177/0022034515593055.
 22. Twelvetrees AE. The lifecycle of the neuronal microtubule transport machinery. Semin Cell Dev Biol. 2020 Nov;107:74-81. doi: 10.1016/j.semcdb.2020.02.008

Информация об авторах

Чучкова Наталья Николаевна – д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой медицинской биологии Ижевской государственной медицинской академии; ул. Коммунаров, 281, Ижевск, 426034, Россия; mig05@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7777-6825>
 Полякова Ольга Леонтьевна – канд. мед. наук, доцент кафедры анатомии и гистологии человека Первого Московского государственного медицинского университета им. И.М. Сеченова; polyakova.olga.oo@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3131-9201>
 Сметанина Марина Викторовна – канд. мед. наук, старший преподаватель кафедры медицинской биологии Ижевской государственной медицинской академии; lisenok0910@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1801-5353>
 Пазиненко Ксения Андреевна – канд. биол. наук, старший преподаватель кафедры медицинской биологии Ижевской государственной медицинской академии; k.pazinenko@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3390-4343>
 Чучков Виктор Михайлович – д-р мед. наук, профессор кафедры физиологии, клеточной биологии и биотехнологии Удмуртского государственного университета; vmchuchkov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7713-0976>

Information about the authors

Natal'ya N. Chuchkova – Doct. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Medical Biology of Izhevsk State Medical Academy; ul. Kommunarov, 281, Izhevsk, 426034, Russia; mig05@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7777-6825>
 Olga L. Polyakova – Cand. Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Anatomy and Histology of I.M. Sechenov First Moscow State Medical University; polyakova.olga.oo@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3131-9201>
 Marina V. Smetanina – Cand. Sci. (Med.), senior lecturer of the Department of Medical Biology of Izhevsk State Medical Academy; lisenok0910@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1801-5353>
 Kseniya A. Pazinenko – Cand. Sci. (Biol.), Senior Lecturer of the Department of Medical Biology of Izhevsk State Medical Academy; k.pazinenko@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3390-4343>
 Viktor M. Chuchkov – Doct. Sci. (Med.), Professor of the Department of Physiology, Cell Biology and Biotechnology Udmurt State University; vmchuchkov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7713-0976>