



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1520>

Перфузия и внутриневральное давление седалищного нерва при сахарном диабете 1 типа в молодом возрасте: мультимодальная оценка (УЗИ, МРТ)

© Фомина С.В.*, Самойлова Ю.Г., Тонких О.С., Кошмелева М.В., Качанов Д.А., Трифонова Е.И., Зоркальцев М.А.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России; 634050 Томск, Московский тракт, д. 2, Российская Федерация

Диабетическая полинейропатия относится к часто встречаемым осложнениям сахарного диабета. Характеризуется поражением периферических нервов с изменениями перфузии и внутриневрального давления. Поиск новых диагностических инструментов является актуальной задачей.

Цель исследования: оценка перфузии и внутриневрального давления седалищных нервов у подростков с сахарным диабетом 1 типа с использованием мультимодального подхода (УЗИ, МРТ).

Материал и методы. Пациенты с сахарным диабетом 1 типа в возрасте 13–17 лет ($n = 50$). Всем пациентам дважды в динамике было выполнено ультразвуковое исследование периферических нервов нижних конечностей с использованием серошкального режима, доплерографии, эластографии сдвиговой волной. МРТ седалищного нерва проведено пациентам ($n = 20$) с использованием методов диффузионно-тензорной трактографии и перфузионного метода один раз.

Выводы. Мультимодальный подход (УЗИ, МРТ) позволяет охарактеризовать перфузию и внутриневральное давление седалищных нервов у подростков с сахарным диабетом 1 типа. Усиление МР-перфузии седалищных нервов сопровождается повышением ультразвуковой жесткости, коэффициента ультразвуковой оценки периферических нервов у подростков с сахарным диабетом 1 типа.

Ключевые слова: диабетическая полинейропатия; ультразвуковое исследование нервов; площадь поперечного сечения; эластография; магнитно-резонансная томография; перфузия

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Фомина С.В., Самойлова Ю.Г., Тонких О.С., Кошмелева М.В., Качанов Д.А., Трифонова Е.И., Зоркальцев М.А. Перфузия и внутриневральное давление седалищного нерва при сахарном диабете 1 типа в молодом возрасте: мультимодальная оценка (УЗИ, МРТ). *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (2): 98–107. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1520>

Поступила в редакцию: 18.12.2024. **Принята к печати:** 09.01.2025. **Опубликована online:** 18.04.2025.

Perfusion and intraneural pressure of the sciatic nerve in type 1 diabetes mellitus at a young age: multimodal assessment (ultrasound, MRI)

© Svetlana V. Fomina*, Iuliia G. Samoiloiva, Olga S. Tonkikh, Marina V. Koshmeleva, Dmitriy A. Kachanov, Ekaterina I. Trifonova, Maxim A. Zorkaltsev

Siberian State Medical University; 2, Moskovskii trakt, Tomsk 634050, Russian Federation



Diabetic polyneuropathy (DPN) is a common complication of diabetes mellitus. It is characterized by damage to peripheral nerves with changes in perfusion and intraneural pressure. The search for new diagnostic tools is an urgent task.

The aim of the study is to assess perfusion and intraneural pressure of the sciatic nerves in adolescents with type 1 diabetes mellitus using a multimodal approach (ultrasound, MRI).

Materials and methods. Patients with type 1 diabetes mellitus aged 13–17 years ($n = 50$). All patients underwent ultrasound examination of the peripheral nerves of the lower extremities twice dynamically, using a greyscale mode, Dopplerography, and shear wave elastography. MRI of the sciatic nerve was performed in patients ($n = 20$) using diffusion tensor tractography and perfusion methods once.

Conclusions. A multimodal approach (ultrasound, MRI) allows us to characterize sciatic nerve perfusion and intraneural pressure in adolescents with type 1 diabetes mellitus. Increased MR perfusion of the sciatic nerves is accompanied by an increase in ultrasonic stiffness and the coefficient of ultrasound assessment of peripheral nerves in adolescents with type 1 diabetes mellitus.

Keywords: diabetic polyneuropathy; ultrasound examination of nerves; cross-sectional area; elastography; magnetic resonance imaging; perfusion

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Fomina S.V., Samoilova Iu.G., Tonkikh O.S., Koshmeleva M.V., Kachanov D.A., Trifonova E.I., Zorkaltsev M.A. Perfusion and intraneural pressure of the sciatic nerve in type 1 diabetes mellitus at a young age: multimodal assessment (ultrasound, MRI). *Medical Visualization*. 2025; 29 (2): 98–107. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1520>

Received: 18.12.2024.

Accepted for publication: 09.01.2025.

Published online: 18.04.2025.

Введение

Диабетическая полинейропатия (ДПН) является распространенным осложнением сахарного диабета (СД), имеет высокую социальную значимость в детском и подростковом возрасте [1]. Рост количества пациентов с СД в популяции требует большого внимания к вопросу раннего выявления и профилактики развития осложнений.

Особенностью течения ДПН является длительный бессимптомный период, что неблагоприятно отражается на отдаленных результатах лечения [2, 3].

Патогенез ДПН на сегодняшний день точно не определен, ученые высказывают разные мнения, теории. Главную роль отводят влиянию хронической гипергликемии, которая запускает каскад патологических изменений, вызывающих поражение стенки мельчайших эндоневральных сосудов с разрушением эндотелиальных клеток, развитием ишемии, приводящей к нарушению структуры и снижению функции нервных волокон. По мнению S. Yagihashi и соавт., уязвимость нервов к ишемии связана с анатомической особенностью кровоснабжения периферических нервов за счет транспериневральных артериол, прободающих периневрий на пути к эндоневрию, и их слабой ауторегуляцией [3, 4]. Снижение кровоснабжения приводит к дистальной сенсорной дегенерации нервных волокон с потерей аксонов и развитием эндоневральной микроангиопатии. Далее поражаются все участки периферических нервов, миелинизированные и немиелинизированные нервные аксоны, перикарион, нервные сосуды и глиальные клетки [1, 3].

Диагностика ДПН основана на клинко-инструментальных методах. Среди методов лучевой диагностики ультразвуковые исследования занимают лидирующие позиции в оценке периферических нервов, так как позволяют исследовать нерв практически на всем протяжении безболезненно, без лучевой нагрузки, быстро. Техническое развитие ультразвуковой диагностики сделало возможным оценить не только размер и структуру периферических нервов, но и измерить жесткость волокон методом эластографии сдвиговой волной (ЭСВ). Данный метод основан на свойствах ткани менять свою жесткость при физиологических процессах, таких как старение, и при патологических изменениях, таких как воспаление и злокачественная трансформация. ЭСВ показала свою эффективность, диагностическую точность при дифференциальной диагностике доброкачественных и злокачественных новообразований поверхностно-расположенных органов, а также в диагностике стадии фиброза печени [5, 6].

Анализ библиографических источников позволяет сделать вывод о высокой эффективности использования ультразвуковой эластографии в диагностике ДПН [7–10]. Ученые связывают увеличение жесткости нервов у пациентов с СД с повышением внутриневрального давления при развитии ишемии в ответ на гипергликемию и делают предположения о возможности использовать данную особенность для динамического наблюдения изменений нервов при ДПН [8–10].

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является “золотым стандартом” среди методов лучевой диагностики [11]. Высокая разрешающая



способность с приближением к уровню гистологического строения, возможность оценить васкуляризацию без использования контрастного вещества открывает новые возможности в нейрорадиологии [11–13]. Однако ряд ограничений, таких как наличие металлических конструкций, клаустрофобия, для детей младшего возраста потребность наркоза в силу длительности исследования, кроме того, большая протяженность нервных стволов с необходимостью посегментарного исследования, что значительно увеличивает длительность процедуры и экономические затраты, не позволяет методу играть ключевую роль в повседневной клинической практике при диагностике ДПН.

Настоящее исследование было предпринято для изучения возможностей аппроксимации применения коэффициента “ультразвуковой оценки периферического нерва” для динамического наблюдения изменений седалищных нервов у подростков с СД 1 типа.

Цель исследования: оценить перфузию и интраваскулярное давление седалищных нервов у подростков с сахарным диабетом 1 типа с использованием мультимодального подхода (УЗИ, МРТ).

Материал и методы

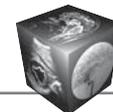
Исследование проведено в клиниках ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России. Протокол исследования одобрен Этическим комитетом ФГБОУ ВО СибГМУ Минздрава России (заключение № 9518 от 28.08.2023).

В исследование были включены данные 50 детей в возрасте от 13 до 17 лет с установленным диагнозом СД 1 типа, ДПН, с уровнем гликированного гемоглобина от 7,6 до 10,4%. Наблюдение проводили в течение года. УЗИ периферических нервов двух нижних конечностей выполняли всем подросткам два раза, временная разница между осмотрами составляла 12 мес. МРТ седалищного нерва средней трети правого бедра проводили один раз в год 20 пациентам.

УЗИ периферических нервов нижних конечностей выполнялись всем пациентам на аппарате экспертного класса Canon Aplio i 700 линейным высокочастотным датчиком до 18 МГц одним врачом ультразвуковой диагностики. Положение пациента при УЗИ – лежа на животе. Исследование включало: серошкальный режим, режим цветового доплеровского картирования (ЦДК), недоплеровскую микроваскуляризацию (SMI), режим ЭСВ. В серошкальном режиме УЗИ выполняли

в поперечных и продольных срезах, оценивали структуру, целостность, отсутствие кистозных и солидных образований в нервах, наличие дифференцировки на фасцикулы. Измерение размеров нервов проводили в поперечных срезах путем ручной трассировки и расчета площади поперечного сечения (ППС). Седалищный нерв измеряли на уровне средней трети бедра, большеберцовый нерв в нижней трети бедра, на 1–2 см ниже бифуркации седалищного нерва, малоберцовый нерв аналогично большеберцовому в нижней трети бедра, на 1–2 см ниже бифуркации седалищного нерва. Ультразвуковую оценку васкуляризации проводили в зонах измерения ППС нервов с использованием режимов ЦДК и SMI, при визуализации локуса кровотока васкуляризация нерва считалась усиленной. Оценку упругоэластических свойств периферических нервов проводили методом ультразвуковой ЭСВ с выполнением правил проведения ЭСВ поверхностно-расположенных органов [5, 6, 14]. Измерения выполняли строго в поперечных срезах нервов, в зонах измерения ППС, со строгим соблюдением правил параллельности и перпендикулярности размещения датчика относительно нерва. Длительность оценки жесткости в каждой зоне исследования составляла не менее 4 с, количество измерений каждого участка не менее 3 раз с автоматическим расчетом медианной жесткости нерва в кПа. Для снижения влияния артефактов измерения мы избегали большей глубины сканирования (более 80 мм), близкого расположения костных структур и крупных сосудов с влиянием передаточной пульсации [14, 15]. Дополнительно к медиане жесткости рассчитывали коэффициент “ультразвуковой оценки периферических нервов” (УПН) по формуле: $УПН = \text{жесткость} / \text{ППС}$ [14]. Данный коэффициент использовали как критерий отбора пациентов в отдельную подгруппу для проведения МРТ. Подгруппа “МРТ” включала 20 пациентов с наибольшим повышением УПН при втором визите в сравнении с первым.

МРТ-исследование проводили на магнитно-резонансном томографе Signa Creator «Е» фирмы GE Healthcare 1,5 Тл (Китай) с использованием методов диффузионно-тензорной трактографии и перфузионного метода. Диффузионно-тензорная трактография – методика МРТ, предоставляющая информацию о состоянии нервных структур и связях между этими структурами. Диффузионно-тензорные изображения фиксируют процессы диффузии молекул воды в биологических тканях. Диффузию называют изотропной, когда молекулы воды (протоны) диффундируют во всех направлениях одинаково, и анизотропной, если молекулы воды перемещаются преимущественно в одном



направлении. В ходе исследования использовали импульсную последовательность – одноимпульсную эхопланарную томографию без подавления сигнала от свободной жидкости с измерением в 20 направлениях коэффициента диффузивности, что позволяло получить серии изображений с одинаковой локализацией срезов для оценки различных трактографических показателей периферических нервов. Алгоритм диффузионно-тензорной трактографии включал получение изображений диффузионной МРТ нервов с протоколом сканирования DTI_high_iso, толщиной среза 2 мм, с использованием встроенной постпроцессорной программы (Neuro 3D), с построением карт фракционной анизотропии, расчетом коэффициента диффузии, диффузионного тензора и реконструкцией проводящих путей в трехмерном режиме (трактографию) с определением количества волокон седалищного нерва в средней трети бедра. Перфузионный метод проводили с использованием методики метки артериальных спинов (arterial spin labeling, ASL) без введения контрастного вещества, с оценкой микроциркуляции, с построением карт мозгового кровотока (CBF). Постобработку полученных данных выполняли при помощи пакета программ ReadyView (GE Healthcare). Во всех случаях карты кровотока совмещали с анатомическими изображениями T2. Во всех случаях применяли программу корегистрации – BrainStat (GE Healthcare).

Статистический анализ был выполнен с помощью программного обеспечения Statistica версия 13.3. Для описания количественных данных инструментальных методов исследования использованы медиана и 25–75-й процентиля. Для сравнения двух независимых групп был использован непараметрический критерий Манна–Уитни. Зависимые группы “до–после” сравнивали непараметрическим критерием Уилкоксона. Оценка корреляционной зависимости между показателями проведена непараметрическим критерием Спирмена. Уровень значимости $p < 0,05$.

Результаты исследования

Предыдущий этап исследования показал наличие изменений упругоэластических свойств периферических нервов при СД 1 типа у детей и подростков в сравнении с контрольной группой здоровых [7, 14]. Были зарегистрированы повышение жесткости нервов, повышение коэффициента УПН седалищного и большеберцового нервов при СД 1 типа с нарастанием размеров крупных стволов нервов (седалищного, большеберцового на бедре) и отсутствием изменений размеров нервов

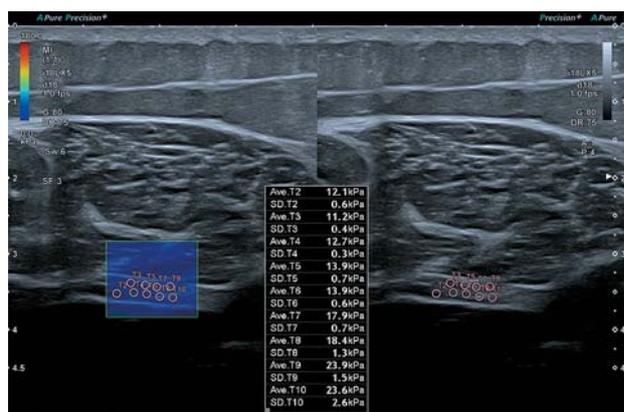


Рис. 1. Повышение жесткости седалищного нерва у пациента 14 лет с СД 1 типа. Метка ультразвукового датчика “Т” относительно седалищного нерва справа в верхнем углу.

Fig. 1. Increased sciatic nerve stiffness in a 14-year-old patient with type 1 diabetes. Ultrasound transducer mark “T” relative to sciatic nerve in upper right corner.

малого калибра (малоберцового, большеберцового на лодыжке) (рис. 1) [14].

Было высказано предположение о возможности использования коэффициента УПН для динамического наблюдения изменений периферических нервов у пациентов с СД 1 типа независимо от возраста.

Анализ изменений упругоэластических свойств нервов в динамике, с разницей между ультразвуковыми осмотрами 12 мес показал наличие тенденции повышения коэффициента УПН при втором визите (рис. 2).

Исходя из формулы расчета коэффициента УПН его повышение могло быть связано с увеличением жесткости либо уменьшением размеров нервов (ППС).

Анализ жесткости, размеров нервов (ППС) зарегистрировал уменьшение ППС у пациентов с СД 1 типа при втором визите. Значение жесткости значимо не менялось в течение года (табл. 1).

Для верификации уменьшения размеров нервов, оценки перфузии была выполнена МРТ седалищного нерва в средней трети бедра, как самого крупного периферического нерва. Учитывая симметричную клиническую картину установленного у всех пациентов диагноза ДПН, отсутствие разницы между ультразвуковыми показателями всех участков исследования правой и левой конечностей на протяжении нашего исследования, было принято решение для первичной оценки достаточно проводить МРТ седалищного нерва средней трети только правого бедра. Критерием отбора

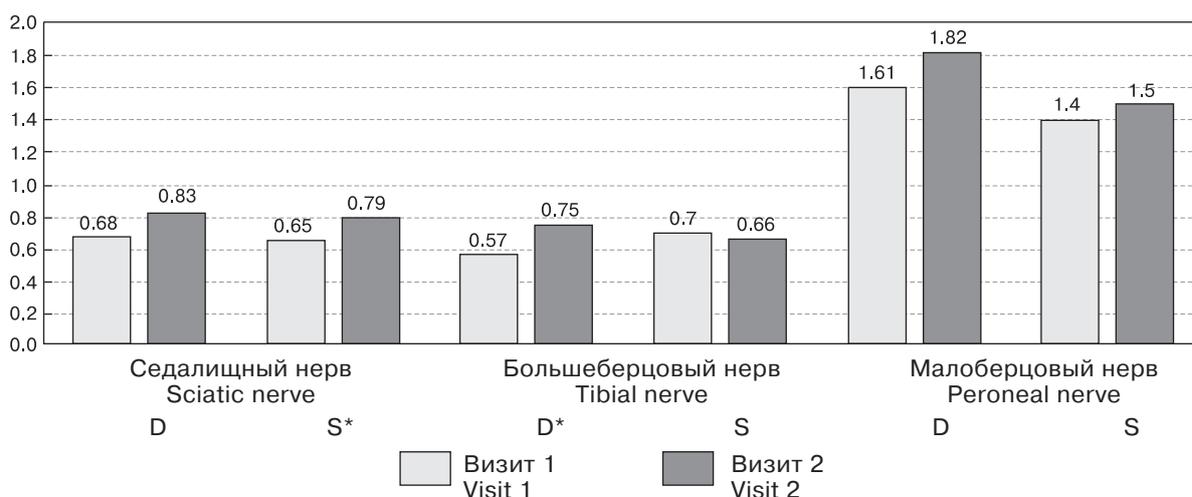


Рис. 2. Динамическое наблюдение коэффициента УПН у подростков с СД 1 типа. * – уровень значимости $p < 0,05$. D – справа, S – слева.

Fig. 2. Dynamic observation of the “Ultrasound assessment of peripheral nerve” (UPN) coefficient in adolescents with type 1 diabetes. * – $p < 0,05$. D – dextra, S – sinistra.

Таблица 1. Сравнение площади поперечного сечения, жесткости седалищного, большеберцового, малоберцового нервов у пациентов с сахарным диабетом 1 типа “визит 1” и “визит 2” (критерий Уилкоксона, уровень значимости $p < 0,05$)

Table 1. Comparison of cross-sectional area, stiffness of the sciatic, tibial, peroneal nerves in patients with type 1 diabetes mellitus “Visit 1” and “Visit 2” (Wilcoxon signed-rank test, significance level $p < 0.05$)

Показатели Indicators	Визит 1 / Visit 1			Визит 2 / Visit 2			P
	медиана median	процентили percentiles		медиана median	процентили percentiles		
		25	75		25	75	
ППС, седалищный нерв (R), мм ² CSA, sciatic nerve (R), mm ²	23.00	18.00	29.00	21.00	18.00	28.00	0.261
ППС, седалищный нерв (L), мм ² CSA, sciatic nerve (L), mm ²	23.00	18.00	29.00	21.00	18.00	26.00	0.012
ППС, большеберцовый нерв (R), мм ² CSA, tibial nerve, on the thigh (R), mm ²	13.00	11.00	15.00	8.00	5.60	11.70	0.001
ППС, большеберцовый нерв (L), мм ² CSA, tibial nerve, on the thigh (L), mm ²	13.00	10.00	15.00	11.00	10.00	14.00	0.048
ППС, малоберцовый нерв (R), мм ² CSA, peroneal nerve (R), mm ²	5.00	4.00	6.00	5.00	4.00	6.00	0.082
ППС, малоберцовый нерв (L), мм ² CSA, peroneal nerve (L), mm ²	5.00	4.00	6.00	4.00	4.00	5.00	0.005
Жесткость, седалищный нерв (R), кПа Stiffness, sciatic nerve (R), kPa	18.50	13.30	23.70	18.20	15.10	23.40	0.630
Жесткость, седалищный нерв (L), кПа Stiffness, sciatic nerve (L), kPa	18.30	13.60	23.80	20.60	14.20	23.40	0.238
Жесткость, большеберцовый нерв (R), кПа Stiffness, tibial nerve, on the thigh (R), kPa	7.50	5.50	9.90	8.00	5.60	11.70	0.427
Жесткость, большеберцовый нерв (L), кПа Stiffness, tibial nerve, on the thigh (L), kPa	7.90	6.00	10.70	7.35	5.60	9.90	0.674
Жесткость, малоберцовый нерв (R), кПа Stiffness, peroneal nerve (R), kPa	5.00	4.00	6.00	8.40	5.80	11.00	0.328
Жесткость, малоберцовый нерв (L), кПа Stiffness, peroneal nerve (L), kPa	7.00	5.00	10.50	4.00	4.00	5.00	0.107

Примечание. ППС – площадь поперечного сечения, R – справа, L – слева.

Note. CSA – cross-sectional area, R – right, L – left.

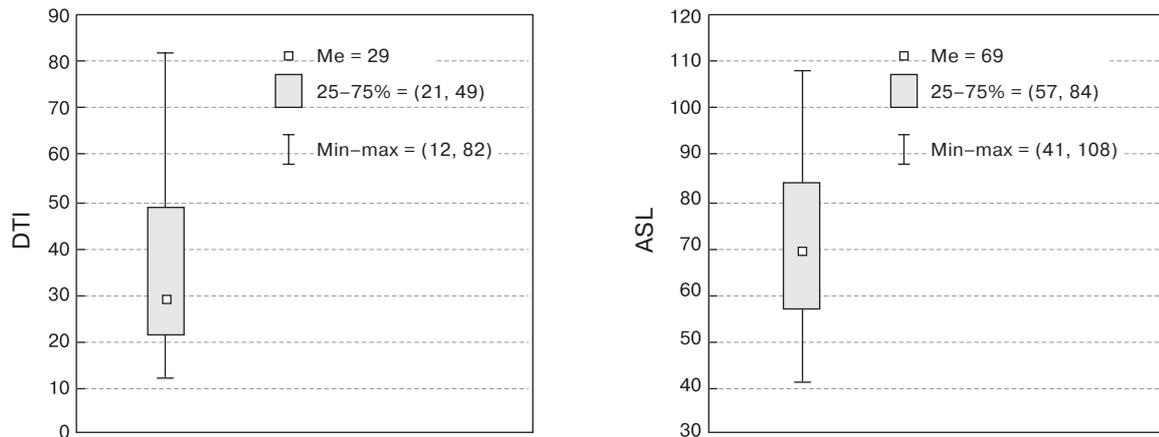


Рис. 3. МР-характеристики седалищных нервов у подростков с сахарным диабетом 1 типа. DTI – количество волокон, ASL – перфузия.

Fig. 3. Magnetic resonance characteristics of the sciatic nerves in adolescents with type 1 diabetes mellitus. DTI – number of fibers, ASL – perfusion.

пациентов для проведения МРТ был выбран ультразвуковой показатель УПН. 20 пациентов с наиболее высоким повышением коэффициента при втором визите относительно первого были выделены в отдельную подгруппу для проведения МРТ. Оценка количества волокон (DTI) по данным МР-диффузионно-тензорной трактографии у 20 подростков с СД 1 типа показала распределение количества волокон от 12 до 82 при сравнении с единственным нормативным показателем DTI, равным 100 для головного мозга, по причине отсутствия нормативов для периферических нервов. Полученный результат соответствовал уменьшению количества волокон (рис. 3) [11]. Предполагаемое уменьшение количества волокон по данным МРТ согласуется с ультразвуковыми результатами измерения ППС седалищного нерва при “визите 2” (см. табл.1).

Принимая во внимание увеличение жесткости нервов по данным эластографии, уменьшение размеров нервов по данным УЗИ и МРТ, следующий этап включал оценку васкуляризации седалищного нерва.

Ультразвуковая доплерография (ЦДК, PW) и не доплеровская васкуляризация (SMI) не зарегистрировали локусы кровотока при исследовании седалищного нерва у пациентов с СД 1 типа.

Бесконтрастная перфузионная МРТ седалищного нерва (ASL) с оценкой микроциркуляции с построением карт скорости кровотока (CBF) показала распределение коэффициента перфузии (ASL) от 41 до 108% у исследуемых пациентов. Сравнение с нормативными показателями для головного мозга ASL, равной 65%, в силу от-

сутствия нормативных значений для периферических нервов показало у 33% подростков с СД 1 типа перфузию менее 65% и 67% пациентов более 65% [12, 13]. Обращает на себя внимание у 33% пациентов усиление перфузии более 84%, что свидетельствует о более вероятной гиперперфузии (рис. 3, 4).

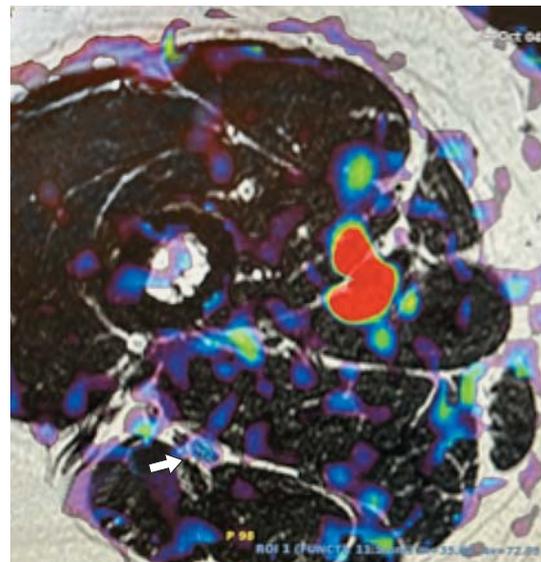


Рис. 4. Измерение перфузии седалищного нерва у подростка с сахарным диабетом 1 типа (ASL). Стрелка указывает зону интереса – седалищный нерв.

Fig. 4. Measurement of sciatic nerve perfusion in an adolescent with type 1 diabetes mellitus (ASL). The arrow indicates the area of interest – the sciatic nerve.



Таблица 2. Сравнение ультразвуковой жесткости седалищного, большеберцового и малоберцового нервов у подростков с сахарным диабетом 1 типа при различной МР-перфузии седалищного нерва (критерий Манна–Уитни, уровень значимости $p < 0,05$)

Table 2. Comparison of ultrasound stiffness of the sciatic, tibial and peroneal nerves in adolescents with type 1 diabetes mellitus at different MR perfusion of the sciatic nerve (Mann–Whitney test, significance level $p < 0.05$)

Показатели Indicators	Перфузия седалищного нерва менее 65% Sciatic nerve perfusion less than 65%			Перфузия седалищного нерва более 65% Sciatic nerve perfusion more than 65%			p
	медиана median	процентили percentiles		медиана median	процентили percentiles		
		25	75		25	75	
Жесткость, седалищный нерв, кПа Stiffness, sciatic nerve, kPa	15.00	11.30	18.70	22.80	18.80	33.90	0.018
Жесткость, большеберцовый нерв, кПа Stiffness, tibial nerve, on the thigh, kPa	6.20	4.40	9.80	10.60	8.60	11.00	0.016
Жесткость, малоберцовый нерв, кПа Stiffness, peroneal nerve, kPa	6.60	5.10	8.10	9.30	8.50	13.40	0.018

Таблица 3. Анализ взаимосвязи МР-перфузии седалищного нерва с ультразвуковой жесткостью, коэффициентом УПН седалищного, большеберцового и малоберцового нервов у подростков с СД 1 типа (критерий Спирмена, уровень значимости $p < 0,05$)

Table 3. Analysis of the relationship between MR perfusion of the sciatic nerve and ultrasonic stiffness, the SPN coefficient of the sciatic, tibial and peroneal nerves in adolescents with type 1 diabetes (Spearman test, significance level $p < 0.05$)

	Жесткость седалищного нерва, кПа Stiffness, sciatic nerve, kPa	УПН седалищного нерва SPN, sciatic nerve	Жесткость большеберцового нерва, кПа Stiffness, tibial nerve, kPa	УПН большеберцового нерва SPN, tibial nerve	Жесткость малоберцового нерва, кПа Stiffness, peroneal nerve, kPa	УПН малоберцового нерва SPN, peroneal nerve
ASL	0.6190*	0.547*	0.461*	0.533*	0.742*	0.071

Примечание. В таблице указан коэффициент корреляции, * – взаимосвязи показателей с уровнем значимости $p < 0,05$.

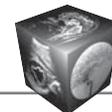
Note. The table shows the correlation coefficient, * – interrelationships between indicators, with a significance level of $p < 0.05$.

Для оценки взаимосвязи ультразвуковой жесткости и перфузии седалищного нерва был выполнен сравнительный анализ показателя жесткости у пациентов с СД 1 типа с разной перфузией по данным МРТ, 1-я группа включала пациентов с перфузией менее 65%, вторая группа с перфузией более 65% (табл. 2). Учитывая анатомию седалищного нерва, наличие в его структуре порции волокон большеберцового и малоберцового нервов, было принято решение проанализировать упругоэластические свойства данных нервов у пациентов с разной перфузией по данным МРТ (см. табл. 2).

Анализ показал статистически значимое повышение жесткости седалищных, большеберцовых и малоберцовых нервов у пациентов с перфузией более 65%.

Следующим этапом был проведен корреляционный анализ для определения взаимосвязи МР-перфузии (ASL) с ультразвуковыми показателями, характеризующими упругоэластические свойства периферических нервов (жесткость, коэффициент УПН), результат представлен в табл. 3.

В результате анализа была выявлена статистически значимая прямо пропорциональная корреляционная связь средней и высокой силы, что позволило сделать вывод о взаимосвязи повышения перфузии седалищного нерва с повышением жесткости седалищного, большеберцового и малоберцового нервов, а также увеличением коэффициента УПН седалищного и большеберцового нервов у подростков с СД 1 типа.



Обсуждение

Учитывая данные литературы, а также результаты собственных исследований, свидетельствующих о повышении жесткости крупных нервов нижних конечностей с увеличением их размеров и одновременным отсутствием увеличения размеров нервов малого калибра, предполагается преобладание механизмов аксональной и смешанной форм поражения в патогенезе развития ДПН [8, 10, 14, 15]. Ученые связывают развитие ишемии нерва с повышением внутриневрального давления вследствие метаболических нарушений в ответ на гипергликемию с накоплением продуктов гликирования, окислительным стрессом, изменением липидов и развитием отека [10, 15]. А.В. Байтингер и соавт. в работе, посвященной исследованию роли кровотока в срединном нерве при развитии синдрома запястного канала, приводят данные, которые заслуживают научного внимания. Авторы ссылаются на ранние экспериментальные исследования Lundborg и соавт. (1982) и Hargens и соавт. (1979) и предполагают, что повышение давления внутри нерва при синдроме запястного канала приводит к снижению венозного оттока с последующим запуском веноартериального рефлюкса (рефлюкса Лериша) и артериальному спазму с дальнейшим прогрессированием ишемии [16]. С.М. Mooshage и соавт. в своем исследовании о связи функций мелких волокон с микрососудистой МР-перфузией периферических нервов у больных СД 2 типа высказывают мнение о тесной связи перфузии нервов с нарушением гемато-нервного барьера, с развитием функциональных нарушений – от их усиления до полной потери. Исследователи обращают внимание на разные состояния МР-перфузии седалищного нерва (снижение, повышение) при разных клинических проявлениях, что может характеризовать разные стадии ДПН [17].

Зарегистрированное в представленном исследовании повышение жесткости нервов в группе с высокой МР-перфузией седалищного нерва, не сопровождаемое увеличением размеров нервов по данным УЗИ и МР-трактографии, а также наличие прямо пропорциональной корреляционной зависимости ультразвуковой жесткости, коэффициента УПН седалищного, большеберцового и малоберцового нервов с показателем МР-перфузии позволяют предположить наличие тесной патогенетической связи процессов васкуляризации с уровнем внутриневрального давления. Учитывая отсутствие при ультразвуковой доплерографии

(ЦДК, PW) и недоплерографической васкуляризации (SMI) зарегистрированного кровотока в периферических нервах нижних конечностей у пациентов с СД 1 типа в молодом возрасте, даже в виде единичных локусов, и отчетливого усиления перфузии нервов при МРТ, можно сделать вывод о наличии изменений на уровне микроциркуляции нервов. Описанные изменения связаны сложным патогенетическим механизмом изменения периферических нервов в ответ на хроническую гипергликемию, включающую развитие ишемии, вероятную активацию сосудистого рефлюкса с последующей гиперперфузией и изменением внутриневрального давления периферических нервов.

Проведенное исследование доказало возможность использовать мультимодальный подход в оценке внутриневрального давления, перфузии седалищного нерва у подростков с СД 1 типа, а также возможную аппроксимацию оценки МР-перфузии седалищных нервов более доступным ультразвуковым методом для динамического наблюдения детей и подростков с СД 1 типа.

Дальнейшие исследования с большим количеством данных пациентов, сопоставление с результатами клиничко-лабораторных исследований позволят установить зависимость изменения перфузии, внутриневрального давления периферических нервов от гипергликемии, дислипидемии, длительности СД 1 типа, определить траекторию изменений перфузии и нормативные показатели для данной категории пациентов.

Выводы

1. Мультимодальный подход (УЗИ, МРТ) позволяет объективно охарактеризовать перфузию и внутриневральное давление седалищных нервов у подростков с сахарным диабетом 1 типа.

2. Усиление МР-перфузии седалищных нервов сопровождается повышением ультразвуковой жесткости, коэффициента ультразвуковой оценки периферических нервов у подростков с сахарным диабетом 1 типа.

Участие авторов

Фомина С.В. – написание статьи, сбор данных, анализ и интерпретация данных, оформление рукописи.

Самойлова Ю.Г. – разработка концепции и дизайна публикации, проверка интеллектуального содержания, окончательное утверждение рукописи для публикации.

Тонких О.С., Кошмелева М.В., Трифонова Е.И., Качанов Д.А., Зоркальцев М.А. – сбор данных, поиск литературы, проверка интеллектуального содержания.



Authors contributions

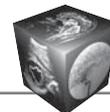
Fomina S.V. – article writing, data collection, data analysis and interpretation, manuscript preparation.

Samoilova Iu.G. – development of the concept and design of the publication, verification of intellectual content, final approval of the manuscript for publication.

Tonkikh O.S., Koshmeleva M.V., Trifonova E.I., Kachanov D.A., Zorkaltsev M.A. – data collection, literature search, intellectual content check.

Список литературы [References]

1. Kallinikou D., Soldatou A., Tsentidis C. et al. Diabetic neuropathy in children and adolescents with type 1 diabetes mellitus: Diagnosis, pathogenesis, and associated genetic markers. *Diabetes Metab. Res. Rev.* 2019; 35 (7): e3178. <https://doi.org/10.1002/dmrr.3178>
2. Borire A.A., Issar T., Kwai N.C. et al. Correlation between markers of peripheral nerve function and structure in type 1 diabetes. *Diabetes Metab. Res. Rev.* 2018; 34 (7): e3028. <https://doi.org/10.1002/dmrr.3028>
3. Sloan G., Selvarajah D., Tesfaye S. Pathogenesis, diagnosis and clinical management of diabetic sensorimotor peripheral neuropathy. *Nat. Rev. Endocrinol.* 2021; 17 (7): 400–420. <https://doi.org/10.1038/s41574-021-00496-z>
4. Yagihashi S., Mizukami H., Sugimoto K. Mechanism of diabetic neuropathy: Where are we now and where to go? *J. Diabetes Investig.* 2011; 2 (1): 18–32. <https://doi.org/10.1111/j.2040-1124.2010.00070.x>
5. Эластография сдвиговых волн. Анализ клинических примеров (практическое руководство для последипломной профессиональной переподготовки врачей): Учебное пособие для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы высшего образования по специальности 31.08.11 Ультразвуковая диагностика (уровень ординатуры). 2-е изд., перераб. и доп. А.В. Борсуков и др. / Под ред. А.В. Борсукова. СИМК, 2022. 468 с. ISBN 978-5-91894-102. Shear Wave Elastography. Analysis of Clinical Cases (a practical guide for postgraduate professional retraining of physicians): a teaching aid for use in the educational process of educational institutions implementing higher education programs in the specialty 31.08.11 Ultrasound Diagnostics (residency level). 2nd ed., revised and enlarged. A.V. Borsukov et al. Ed. A.V. Borsukov. SIMK, 2022. 468 p. ISBN 978-5-91894-102. (In Russian)
6. Ferraioli G., Barr R.G., Farrokh A. et al. How to perform shear wave elastography. Part II. *Med. Ultrason.* 2022; 24 (2): 196–210. <https://doi.org/10.11152/mu-3342>
7. Фомина С.В., Завадовская В.Д., Самойлова Ю.Г., Кудлай Д.А., Кошмелева М.В., Качанов Д.А., Трифонова Е.И., Зоркальцев М.А., Юн В.Э. Ультразвуковая оценка периферических нервов у пациентов с сахарным диабетом типа 1 различной длительности в детском и подростковом возрасте. *Врач.* 2023; 34 (12): 17–24. <https://doi.org/10.29296/25877305-2023-12-04>
Fomina S.V., Zavadovskaya V.D., Samoilova Yu.G. et al. Ultrasound assessment of peripheral nerves in patients with type 1 diabetes mellitus of varying duration in childhood and adolescence. *Vrach (The Doctor).* 2023; 34 (12): 17–24. <https://doi.org/10.29296/25877305-2023-12-04> (In Russian)
8. Wang C., Wang H., Zhou Y. et al. Evaluation of the clinical value of shear wave elastography for early detection and diagnosis of diabetic peripheral neuropathy: a controlled preliminary prospective clinical study. *BMC Musculoskelet Disord.* 2022; 23 (1): 1120. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-06085-z>
9. Aslan M., Aslan A., Emeksiz H.C. et al. Assessment of Peripheral Nerves With Shear Wave Elastography in Type 1 Diabetic Adolescents Without Diabetic Peripheral Neuropathy. *J. Ultrasound Med.* 2019; 38 (6): 1583–1596. <https://doi.org/10.1002/jum.14848>
10. He Y., Xiang X., Zhu B.H., Qiu L. Shear wave elastography evaluation of the median and tibial nerve in diabetic peripheral neuropathy. *Quant. Imaging Med. Surg.* 2019; 9 (2): 273–282. <https://doi.org/10.21037/qims.2019.02.05>
11. Самойлова Ю.Г., Матвеева М.В., Тонких О.С., Кудлай Д.А., Олейник О.А., Фимушкина Н.Ю., Гергет О.М., Борисова А.А. Трактография головного мозга при сахарном диабете и когнитивных нарушениях. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2020; 120 (10): 33–37. <https://doi.org/10.17116/jnevro202012010133>
Samoilova Yu.G., Matveeva M.V., Tonkikh O.S. et al. Brain tractography in type 1 and 2 diabetes and cognitive impairment. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2020; 120 (10): 33–37. (In Russian)
12. Нейровизуализация головного мозга при сахарном диабете / Ю.Г. Самойлова, М.В. Матвеева, Н.Г. Жукова и др. Томск: Изд-во “Печатная мануфактура”, 2020. 72 с. Neuroimaging of the brain in diabetes mellitus / Yu.G. Samoilova, M.V. Matveeva, N.G. Zhukova et al. Tomsk: Printing Manufactory Publishing House, 2020. 72 p. (In Russian)
13. Самойлова Ю.Г., Матвеева М.В., Тонких О.С., Лейман О.П., Гергет О.М. Оценка особенностей нейроваскуляризации у пациентов с сахарным диабетом 2-го типа с использованием различных методов магнитно-резонансной перфузии. *Лучевая диагностика и терапия.* 2021; 12 (1): 36–48. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2021-12-1-36-48>
Samoilova Yu.G., Matveeva M.V., Tonkikh O.S. et al. Options of neurovascularization in patients with type 2 diabetes mellitus using different methods of magnetic resonance perfusion. *Diagnostic radiology and radiotherapy.* 2021; 12 (1): 36–48. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2021-12-1-36-48> (In Russian)
14. Фомина С.В., Завадовская В.Д., Самойлова Ю.Г., Кошмелева М.В., Качанов Д.А., Трифонова Е.И., Зоркальцев М.А., Юн В.Э. Возможности ультразвуковой эластографии периферических нервов у детей с сахарным диабетом 1 типа. *Медицинская визуализация.* 2024; 28 (4): 133–141. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1437>
Fomina S.V., Zavadovskaya V.D., Samoilova I.G. et al. Possibilities of ultrasound elastography of peripheral nerves in children with type 1 diabetes mellitus. *Medical Visualization.* 2024; 28 (4): 133–141. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1437> (In Russian)
15. Jiang W., Huang S., Teng H. et al. Diagnostic performance of two-dimensional shear wave elastography for evaluating tibial nerve stiffness in patients with diabetic peripheral



- neuropathy. *Eur. Radiol.* 2019; 29 (5): 2167–2174. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5858-4>
16. Байтингер А.В., Байтингер В.Ф., Магай Ю.В., Чирьев А.И. Роль кровотока в изменении внутриканального давления: новая этиопатогенетическая теория синдрома запястного канала. *Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии.* 2024; 8. <https://doi.org/10.33920/med-01-2407-10>
Baitinger A.V., Baitinger V.F., Magay Yu.V., Chiryev A.I. Role of blood flow in intracanal pressure: a novel theory of carpal tunnel syndrome etiology. *Bulletin of Neurology, Psychiatry and Neurosurgery.* 2024; 8. <https://doi.org/10.33920/med-01-2407-10> (In Russian)
17. Mooshage C.M., Schimpfle L., Kender Z. et al. Association of Small Fiber Function with Microvascular Perfusion of Peripheral Nerves in Patients with Type 2 Diabetes: Study using Quantitative Sensory Testing and Magnetic Resonance Neurography. *Clin. Neuroradiol.* 2024; 34 (1): 55–66. <https://doi.org/10.1007/s00062-023-01328-5>

Для корреспонденции*: Фомина Светлана Викторовна – e-mail: statfom@mail.ru

Фомина Светлана Викторовна – канд. мед. наук, доцент, заведующая отделением, врач ультразвуковой диагностики ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0001-7517-3393>.

E-mail: statfom@mail.ru

Самойлова Юлия Геннадьевна – доктор мед. наук, профессор, заведующая кафедрой педиатрии с курсом эндокринологии ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-2667-4842>

E-mail: samoilova_y@inbox.ru

Тонких Ольга Сергеевна – канд. мед. наук, заведующая отделением томографических методов ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0003-0589-0260>. E-mail: ostonkih@mail.ru

Кошмелева Марина Владиславовна – канд. мед. наук, доцент, доцент кафедры педиатрии с курсом эндокринологии ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0001-8142-1226>.

E-mail: mvbulavko@mail.ru

Качанов Дмитрий Андреевич – лаборант-исследователь кафедры педиатрии с курсом эндокринологии ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-6519-8906>

E-mail: doctorssmupf@gmail.com

Трифоновна Екатерина Ивановна – ассистент кафедры педиатрии с курсом эндокринологии ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-2825-5035>

E-mail: trifonowa.18@yandex.ru

Зоркальцев Максим Александрович – доктор мед. наук, доцент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0003-0025-2147>. E-mail: Zorkaltsev@mail.ru

Contact*: Svetlana V. Fomina – e-mail: statfom@mail.ru

Svetlana V. Fomina – Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Radiation Diagnostics and Radiation Therapy, Head of the Department – Doctor of Ultrasound Diagnostics, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0001-7517-3393>.

E-mail: statfom@mail.ru

Iuliia G. Samoilova – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head Department of Pediatrics with a course of endocrinology, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-2667-4842>. E-mail: samoilova_y@inbox.ru

Olga S. Tonkikh – Cand. of Sci. (Med.), Chair of the Department of Tomographic Methods, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0003-0589-0260>. E-mail: ostonkih@mail.ru

Marina V. Koshmeleva – Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Pediatrics with a Course of Endocrinology, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0001-8142-1226>. E-mail: mvbulavko@mail.ru

Dmitriy A. Kachanov – Laboratory researcher at the Department of Pediatrics with a course of endocrinology, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-6519-8906>. E-mail: doctorssmupf@gmail.com

Ekaterina I. Trifonova – Assistant of the department of pediatrics with a course of endocrinology, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-2825-5035>. E-mail: trifonowa.18@yandex.ru

Maxim A. Zorkaltsev – MD, Doct. of Sci. (Med.), Associate Professor of the Radiology and Radiotherapy Department, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0003-0025-2147>. E-mail: Zorkaltsev@mail.ru