

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD636128>

EDN: ITFWJQ

Количественные параметры магнитно-резонансной томографии плечевых сплетений у здоровых взрослых и ассоциированные признаки: пилотное одномоментное исследование

С.Н. Морозова¹, В.В. Синькова¹, В.А. Орлов², С.И. Карташов², А.А. Пойда², С.С. Ханина³,
Д.А. Гришина¹, Н.А. Супонева¹, М.В. Кротенкова¹

¹ Российский центр неврологии и нейронаук, Москва, Россия;

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия;

³ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Стандартные последовательности магнитно-резонансной томографии позволяют проводить лишь качественную оценку изображений, которая является в известной степени субъективной. В то же время разработаны количественные методики, позволяющие объективизировать интерпретацию и расширять диагностические возможности. Ранее их применяли преимущественно для исследования головного мозга и суставов. Однако современное состояние технических средств позволяет использовать их для анализа состояния периферических нервов.

Цель исследования. Изучить особенности количественных параметров магнитно-резонансной томографии элементов плечевых сплетений в зависимости от стороны и уровня спинномозговых нервов, демографических и антропометрических показателей у здоровых взрослых.

Методы. В исследование включены 10 здоровых добровольцев, перед магнитно-резонансной томографией на томографе с величиной магнитной индукции 3 Тл у пациентов регистрировали основные демографические и антропометрические показатели. В протокол исследования, помимо стандартных последовательностей, включены режимы, позволяющие получить данные T2-релаксометрии и индекса переноса намагниченности от нервных элементов плечевых сплетений. Постобработку данных проводили на базе программного пакета MATLAB, затем на полученных картах вручную отмечали зоны интереса с получением числовых значений. Кроме того, измеряли толщину нервных элементов. Статистическую обработку данных проводили в программе SPSS.

Результаты. Получены числовые значения количественных параметров магнитно-резонансной томографии (измеряемое время T2-релаксации, протонная плотность, индекс переноса намагниченности, толщина) передних ветвей спинномозговых нервов, формирующих плечевое сплетение, для каждого участника исследования. Выявлено наличие градиента толщины передних ветвей в норме с наибольшим значением на уровне передних ветвей седьмых шейных спинномозговых нервов. Анализ связей количественных параметров магнитно-резонансной томографии с демографическими и антропометрическими признаками показал значимую положительную связь между временем T2-релаксации и возрастом, а также значимые отрицательные взаимосвязи между ростом и измеряемым временем T2-релаксации, ростом и протонной плотностью.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учитывать возраст и рост при проведении дальнейших исследований параметров T2-релаксации как у здоровых людей, так и у пациентов с различными патологиями плечевых сплетений. Кроме того, при измерении толщины передних ветвей плечевых сплетений с использованием стандартных последовательностей целесообразно учитывать не только размеры нервных элементов, но и оценивать соблюдение градиента их толщины.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография; плечевые сплетения; T2-релаксометрия; перенос намагниченности; количественные методики.

Как цитировать:

Морозова С.Н., Синькова В.В., Орлов В.А., Карташов С.И., Пойда А.А., Ханина С.С., Гришина Д.А., Супонева Н.А., Кротенкова М.В. Количественные параметры магнитно-резонансной томографии плечевых сплетений у здоровых взрослых и ассоциированные признаки: пилотное одномоментное исследование // Digital Diagnostics. 2025. Т. 6, № 3. С. 427–439. DOI: 10.17816/DD636128 EDN: ITFWJQ

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD636128>

EDN: ITFWJQ

Quantitative Parameters of Magnetic Resonance Imaging of the Brachial Plexus in Healthy Adults and Associated Signs: A Pilot Cross-Sectional Study

Sofya N. Morozova¹, Viktoriya V. Sinkova¹, Vyacheslav A. Orlov², Sergey I. Kartashov², Alexey A. Poyda², Sandaara S. Khanina³, Darya A. Grishina¹, Natalia A. Suponeva¹, Marina V. Krotenkova¹

¹ Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia;

² National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia;

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Standard magnetic resonance imaging sequences only provide qualitative image assessment, which is rather subjective. However, some quantitative techniques can interpret findings more objectively and expand diagnostic capabilities. Previously, they were mainly used for brain and joint scans; however, current technology allows using them for evaluating peripheral nerve function.

AIM: This study aimed to evaluate quantitative parameters of magnetic resonance imaging of the brachial plexus elements in healthy adults, depending on the side and level of spinal nerves and demographic and anthropometric characteristics.

METHODS: Ten healthy volunteers were included. Their main demographic and anthropometric characteristics were recorded before they underwent magnetic resonance imaging. A 3T magnetic resonance imaging scanner was used. In addition to standard sequences, the scan protocol included regimens for obtaining T2 relaxation times and magnetization transfer ratios from nerve elements of the brachial plexus. Data were post-processed using the MATLAB software package. Then, regions of interest were manually assigned to in the maps, and numerical values were obtained. Furthermore, thickness of the nerve elements was measured. Data were statistically processed using the SPSS software.

RESULTS: In each participant, the numerical values of the quantitative magnetic resonance imaging parameters (measured T2 relaxation time, proton density, magnetization transfer ratio, and thickness) in the anterior rami of the spinal nerves that form the brachial plexus were obtained. The thickness gradient of the normal anterior rami was revealed, with the highest value occurring at the level of the anterior rami of cervical spinal nerve C7. Significant positive correlations between T2 relaxation time and age were determined by analysis of the associations between quantitative magnetic resonance imaging parameters and demographic and anthropometric characteristics. In addition, negative correlations were found between height and measured T2 relaxation time and proton density.

CONCLUSION: The study results indicate that future research on T2 relaxation parameters should consider age and height in both healthy volunteers and patients with a brachial plexus condition. Additionally, when measuring the thickness of the anterior rami of the brachial plexus using standard sequences, the size and thickness gradient of the nerve elements should be considered.

Keywords: magnetic resonance imaging; brachial plexus; T2 relaxometry; magnetization transfer; quantitative techniques.

To cite this article:

Morozova SN, Sinkova VV, Orlov VA, Kartashov SI, Poyda AA, Khanina SS, Grishina DA, Suponeva NA, Krotenkova MV. Quantitative Parameters of Magnetic Resonance Imaging of the Brachial Plexus in Healthy Adults and Associated Signs: A Pilot Cross-Sectional Study. *Digital Diagnostics*. 2025;6(3):427–439. DOI: 10.17816/DD636128 EDN: ITFWJQ

Submitted: 17.09.2024

Accepted: 05.02.2025

Published online: 12.09.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD636128>

EDN: ITFWJQ

健康成人臂丛磁共振定量参数及相关特征：一项横断面初步研究

Sofya N. Morozova¹, Viktoriya V. Sinkova¹, Vyacheslav A. Orlov², Sergey I. Kartashov², Alexey A. Poyda², Sandaara S. Khanina³, Darya A. Grishina¹, Natalia A. Suponeva¹, Marina V. Krotenkova¹

¹ Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow, Russia;

² National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia;

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

摘要

论证：标准磁共振成像序列仅能进行定性评估，在一定程度上具有主观局限性。近年来发展出的定量方法可使解释更为客观，并拓展诊断潜能。此前这些方法主要用于脑和关节的研究。而当前技术条件已使其能够用于外周神经状态的分析。

目的：探讨健康成人臂丛神经在不同侧别、不同脊神经水平的磁共振成像定量参数特征及其与人口学和人体测量学指标的关系。

方法：本研究纳入10名健康志愿者。在3.0 T磁共振成像扫描前记录人口学和人体测量学指标。检查方案除标准序列外，还包括T2弛豫测量和磁化转移指数模式。利用MATLAB进行数据后处理，并在生成的图像中手动圈定感兴趣区，获取数值指标。同时测量神经成分的厚度。统计分析使用SPSS软件。

结果：获得了形成臂丛的脊神经前支的磁共振成像定量参数（T2弛豫时间、质子密度、磁化转移比、厚度）的数值，并针对每位受试者进行了测量。结果显示前支厚度存在梯度，最大值出现在第七颈神经前支水平。磁共振成像定量参数与人口学及人体测量学特征的关联分析显示，T2弛豫时间与年龄之间存在显著正相关，而身高与T2弛豫时间及质子密度之间均存在显著负相关。

结论：结果提示，在进一步研究T2弛豫参数时，无论是健康人群还是臂丛病变患者，均需考虑年龄与身高的影响。此外，在利用标准磁共振成像序列测量臂丛前支厚度时，应不仅关注神经尺寸，还应评估其厚度梯度。

关键词：磁共振成像；臂丛；T2弛豫测量；磁化转移指数；定量方法。

引用本文：

Morozova SN, Sinkova VV, Orlov VA, Kartashov SI, Poyda AA, Khanina SS, Grishina DA, Suponeva NA, Krotenkova MV. 健康成人臂丛磁共振定量参数及相关特征：一项横断面初步研究. *Digital Diagnostics*. 2025;6(3):427–439. DOI: 10.17816/DD636128 EDN: ITFWJQ

收到: 17.09.2024

接受: 05.02.2025

发布日期: 12.09.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Поражения нервной системы — группа распространённых заболеваний, более половины случаев которых составляют патологии периферической нервной системы [1, 2]. Особое беспокойство вызывают периферические полинейропатии у людей трудоспособного возраста, ассоциированные с высоким риском инвалидизации по причине несвоевременной диагностики и позднего начала терапии [3]. «Золотым стандартом» диагностики заболеваний периферической нервной системы является стимуляционная и игольчатая электронейромиография [4]. Однако этот метод имеет определённые ограничения, включая оператор-зависимость, низкую чувствительность при длительном течении периферической полинейропатии с атрофией дистальных отделов нервов, а также невозможность оценки окружающих нервы структур [4]. Другим распространённым методом диагностики периферических полинейропатий является ультразвуковое исследование. Тем не менее его применение ограничено глубиной расположения невралгических структур, невозможностью определения первичного типа поражения нервных волокон и также оператор-зависимостью [5]. Всё вышесказанное затрудняет диагностику поражений проксимальных отделов периферической нервной системы, в частности плечевых сплетений [6].

В диагностике заболеваний плечевых сплетений — травматических повреждений, новообразований, компрессионных синдромов, а также периферических полинейропатий — всё чаще стали использовать магнитно-резонансную томографию (МРТ) [7]. Её результаты учитывают в качестве поддерживающих критериев диагностики хронической воспалительной демиелинизирующей полинейропатии и моторной мультифокальной нейропатии [8, 9]. Однако изменения, регистрируемые на стандартных нейрографических последовательностях [повышение интенсивности сигнала от нервов в режимах с жироподавлением, чувствительных к сигналу от жидкости (STIR¹, T2 FatSat², T2 Dixon³), утолщение элементов сплетений], по нашему опыту, как правило, неспецифичны и не позволяют дифференцировать варианты полинейропатий, а при двустороннем симметричном поражении даже отличие патологии от нормы может быть затруднено. Это связано прежде всего с вариативностью строения плечевых сплетений у здоровых [10]. Кроме того, в качестве порогового значения толщины передних ветвей спинномозговых нервов принята высота в коронарной проекции 5 мм [11], однако их толщина может отличаться в зависимости от уровня [12], что также затрудняет объективную

оценку наличия утолщений. Интенсивность МР-сигнала на стандартных последовательностях является относительной величиной и её невозможно использовать для количественной оценки наличия и степени патологических изменений. Как следствие, качество диагностики патологических изменений плечевых сплетений, в частности при полинейропатиях, а также некоторых других заболеваний, во многом зависит от опыта врача-рентгенолога [13]. В связи с этим перспективным представляется использование для оценки состояния плечевых сплетений количественных методик МРТ (T2-релаксометрии, исследования с переносом намагниченности), применение которых позволяет получить абсолютные числовые параметры, характеризующие макромолекулярную структуру тканей. Их эффективность продемонстрирована при исследованиях головного мозга [14, 15].

T2-релаксометрия рассчитывает характеристики релаксации тканей — измеряемое время T2-релаксации (T2_{app}) и протонную плотность (ρ). Увеличение T2_{app} в основном связано с увеличением количества свободных протонов, что может происходить при эндоневральном отёке в связи с аксональным повреждением [7], тогда как показатель ρ коррелирует с изменениями микроструктуры внеклеточного матрикса в результате воспалительных изменений и демиелинизации [16]. Указанные показатели являются перспективными для определения первичного типа поражения нервных волокон, что необходимо для ранней диагностики и своевременного начала лечения в таких случаях.

Визуализация с переносом намагниченности основана на обмене молекулами между пулами связанной и несвязанной воды в тканях. При пресатурации (добавлении подготовительного нерезонансного радиочастотного импульса для избирательного подавления связанной воды) подавляется и вектор намагниченности свободной воды, что и характеризует феномен переноса намагниченности [17]. В тканях тела человека этот эффект можно оценить с помощью индекса переноса намагниченности (Magnetization Transfer Ratio, MTR): при повреждении пула макромолекул любого генеза индекс уменьшается [17]. Таким образом, по нашему мнению, сомнительно, что этот показатель является достаточным для определения первичного типа поражения, однако его можно рассматривать в комплексе с показателями T2-релаксометрии, а также оценивать наличие и выраженность повреждений.

Изучение показателей T2-релаксометрии в проксимальных элементах плечевых сплетений выполнено в единичных работах [18, 19], тогда как исследование MTR в передних ветвях спинномозговых нервов, формирующих

¹ STIR (Short TI Inversion Recovery) — последовательность магнитно-резонансной томографии с подавлением сигнала от жировой ткани за счёт применения инверсионного импульса с коротким временем инверсии.

² T2 FatSat (T2-weighted with Fat Saturation) — T2-взвешенная последовательность с подавлением сигнала от жировой ткани с помощью частотного селективного подавления.

³ T2 Dixon (T2-weighted Dixon Method) — метод, основанный на различии частотного сдвига воды и жира.

плечевые сплетения, у здоровых лиц, как и комплексную оценку данных параметров, ранее не проводили. Стандартных последовательностей МРТ для получения подобных данных нет, алгоритм их обработки также не определён. Учитывая значительное количество пациентов с заболеваниями периферической нервной системы, в частности с полинейропатиями [3], исследование дополнительного инструмента для оценки плечевых сплетений представляется перспективным в плане повышения точности и скорости первичной и дифференциальной диагностики данных патологий. Кроме того, остаётся малоизученной связь параметров количественной МРТ плечевых сплетений с демографическими (пол, возраст) и антропометрическими (рост, масса тела, индекс массы тела, толщина нервных элементов) характеристиками. Указанные показатели могут значительно отличаться у пациентов с одним и тем же заболеванием периферической нервной системы (в частности, с одной и той же полинейропатией), поэтому для более объективной оценки количественных МРТ-параметров плечевых сплетений актуальным является изучение наличия связей с ними демографических и антропометрических данных.

ЦЕЛЬ

Изучить особенности количественных МРТ-параметров элементов плечевых сплетений в зависимости от стороны и уровня спинномозговых нервов, демографических и антропометрических показателей у здоровых взрослых.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Проведено пилотное (предварительное) одноцентровое проспективное одномоментное несравнительное исследование.

Условия проведения

В исследование включали лиц, обследованных в отделе лучевой диагностики Российского центра неврологии и нейронаук (Москва) в период с апреля по сентябрь 2023 г.

Критерии соответствия

Критерии включения:

- возраст старше 18 лет;
- отсутствие клинических признаков поражения плечевых сплетений (боли и слабости в верхней конечности и надплечье);
- отсутствие сведений о поражениях плечевых сплетений в анамнезе.

Критерии не включения:

- сведения об имеющейся патологии центральной нервной системы (демиелинизирующие, неопластические, нейродегенеративные заболевания);

- наличие абсолютных противопоказаний к проведению МРТ (наличие металлоконструкций, несовместимых с проведением МРТ, искусственного водителя ритма, несъёмного слухового аппарата и др.).

Критерии исключения:

- отказ участника исследования от прохождения МРТ по различным причинам (например, клаустрофобия);
- регистрации значительных артефактов от движения участника во время процедуры исследования.

Протокол магнитно-резонансной томографии

МРТ проводили на томографе Magnetom Prisma® (Siemens, Германия) с величиной магнитной индукции 3 Тл. Протокол сканирования включал стандартные трёхмерные последовательности T2 [параметры: время повторения (Time Repetition, TR) — 1500 мс; время эхо (Time Echo, TE) — 135 мс; размер реконструированного вокселя — 0,4×0,4×0,8 мм; поле обзора (Field of View, FOV) — 250 мм; количество срезов — 192; длительность сканирования — 6 мин 56 с], STIR¹ [параметры: TR — 3000 мс; TE — 281 мс; время инверсии (Time Inversion, TI) — 230 мс; размер реконструированного вокселя — 0,4×0,4×0,9 мм; FOV — 350 мм; количество срезов — 144; длительность сканирования — 7 мин 27 с] и T1 в коронарной плоскости [параметры: TR — 5,52 мс; TE₁ — 2,46 мс; TE₂ — 3,69 мс; размер вокселя — 1×1×1 мм; FOV — 380 мм; количество срезов — 144; длительность сканирования — 5 мин 58 с].

Ввиду отсутствия стандартных последовательностей для получения данных T2-релаксометрии и переноса намагниченности, учитывая необходимые для этого временные (TR, TE) параметры [20, 21]; параметры контрастности (жироподавление, преднасыщающий импульс) и геометрии срезов (разрешение в плоскости сканирования, толщина) [6], остальные параметры были подобраны авторами путём многократного сканирования для получения оптимального соотношения сигнал-шум. Итоговые параметры последовательностей для плечевых сплетений в аксиальной проекции следующие:

- для получения данных T2-релаксометрии (T2_{dualecho}): TR — 5570 мс; TE₁ — 9,1 мс; TE₂ — 72 мс; размер вокселя — 0,3×0,3×3 мм; количество срезов — 45; расстояние между срезами — 10%, с применением частотного селективного жироподавления (FatSat); время исследования — 10 мин 09 с;
- для расчёта индекса переноса намагниченности — T1 M_{Top}: TR — 33 мс; TE — 7 мс, с добавлением нерезонансного преднасыщающего импульса; угол отклонения — 10°; размер вокселя — 0,3×0,3×3 мм; количество срезов — 45; расстояние между срезами — 10%; время исследования — 4 мин 51 с. T1 M_{Off} — те же параметры, но без добавления нерезонансного преднасыщающего импульса.

Во время сканирования использовали 64-канальную совмещённую радиочастотную катушку для головы и шеи в комбинации с мягкой 18-канальной катушкой для тела на область плечевого пояса, которую завели под шейную на возможное расстояние.

Обработка и анализ изображений

Обработку собранных изображений для получения количественных оценок параметров МРТ проводили с использованием программного пакета MATLAB [MathWorks, Соединённые Штаты Америки (США)], реализующего алгоритм обработки следующими этапами:

- импорт данных МРТ в формате DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine);
- перекодирование данных в формат NIfTI (Neuroimaging Informatics Technology Initiative);
- корегистрация данных трёх импортированных последовательностей (T2dualecho, T1 MToff, T1 MTon);
- расчёт и генерация карт T2app, ρ и MTR;
- сохранение данных в формате NIfTI с возможностью дальнейшего экспорта.

Карты рассчитывали с помощью формул [20, 22]:

$$T2app = \frac{TE_2 - TE_1}{\ln(S(TE_1)/S(TE_2))}, \quad (1)$$

где $T2app$ — измеряемое время T2-релаксации; TE_1 и TE_2 — время эхо; $S(TE_1)$ — сигнал при времени эхо TE_1 ; $S(TE_2)$ — сигнал при времени эхо TE_2 ;

$$\rho = \frac{S(TE_1)}{\exp(-TE_1/T2app)}, \quad (2)$$

где ρ — протонная плотность; TE_1 — время эхо; $S(TE_1)$ — сигнал при времени эхо TE_1 ;

$$MTR = \frac{(S_0 - S_1)}{S_0} \times 100, \quad (3)$$

где MTR — индекс переноса намагниченности; S_0 — сигнал до переноса; S_1 — сигнал после переноса.

Полученные карты загружали в программу для визуализации ITK-SNAP® (University of Pennsylvania, США)⁴. На картах с использованием в качестве подложки данных МРТ последовательности T2dualecho в аксиальной

плоскости с построением трёхмерной реконструкции для облегчения определения анатомических структур врач-рентгенолог с опытом работы 16 лет (4 года — визуализация периферической нервной системы) выделил зоны интереса в передних ветвях спинномозговых нервов [от 5 шейных (C5) спинномозговых нервов до первых грудных (Th1)] на расстоянии 1–2 см от спинального ганглия (рис. 1). Полученные значения внесли в таблицу для последующего анализа. В случае большого среднеквадратичного (стандартного) отклонения (более 30%), значение считали недостоверным и не фиксировали. Таким образом, были исключены данные части передних ветвей Th1 спинномозговых нервов, поскольку их близкое расположение к верхушкам лёгких и сосудистым структурам делает их наиболее уязвимыми к артефактам, связанным с неоднородным жироводавлением, пульсацией сосудов и дыхательными движениями [6]. Толщину передних ветвей C5–Th1 спинномозговых нервов измеряли по данным стандартной трёхмерной последовательности STIR¹ перпендикулярно ходу соответствующего нервного элемента на расстоянии 1–2 см от спинального ганглия.

Целевые показатели исследования

Определяли числовые значения для показателей T2app, ρ и MTR от передних ветвей спинномозговых нервов, образующих плечевые сплетения. Дополнительно определяли толщину передних ветвей спинномозговых нервов, образующих плечевое сплетение, с обеих сторон. Оценивали ассоциацию количественных параметров МРТ с демографическими (пол, возраст) и антропометрическими данными (масса тела, рост, индекс массы тела). Последние регистрировали непосредственно до проведения МРТ.

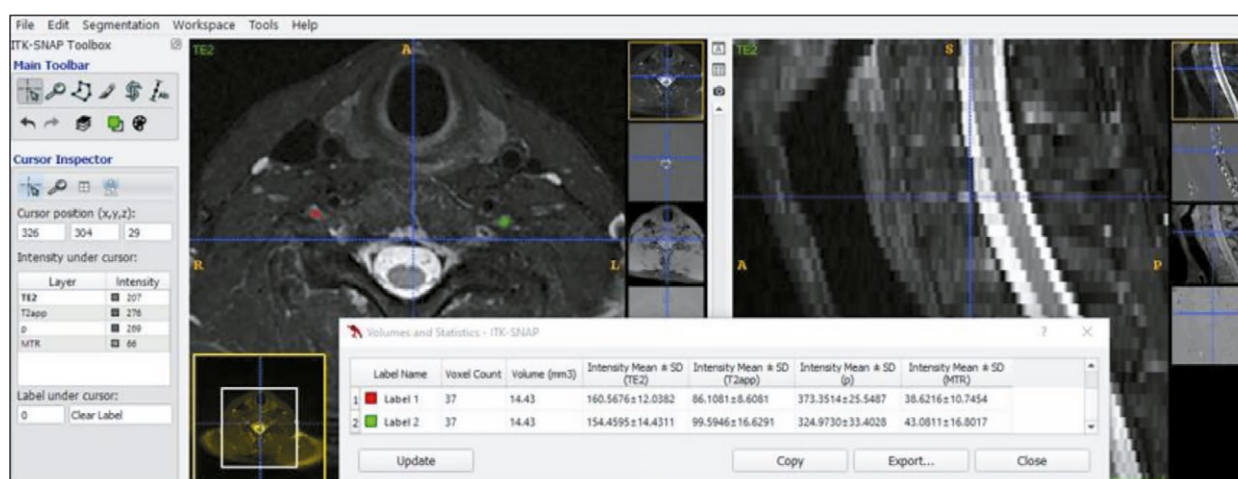


Рис. 1. Измерение количественных показателей (T2app, ρ , MTR) магнитно-резонансной томографии передних ветвей 7 шейных спинномозговых нервов с обеих сторон у здорового мужчины в возрасте 42-х лет. Визуализация выполнена в программе ITK-SNAP® (University of Pennsylvania, США). T2app — измеряемое время T2-релаксации; ρ — протонная плотность; MTR (Magnetization Transfer Ratio) — индекс переноса намагниченности.

⁴ Программа для визуализации ITK-SNAP [Internet]. В: ITK-SNAP, 2020–2024. Режим доступа: <https://www.itksnap.org> Дата обращения: 14.06.2024.

Этическая экспертиза

Протокол исследования одобрен локальным этическим комитетом Российского центра неврологии и нейро-наук (протокол № 1-3/22 от 19.01.2022). Все потенциальные участники подписывали информированное добровольное согласие на участие в исследовании.

Статистический анализ

Принципы расчёта размера выборки. Размер выборки предварительно не рассчитывали. Он определён произвольно ввиду пилотного характера исследования.

Методы статистического анализа данных. Анализ данных проводили с помощью пакета статистических программ SPSS Statistics®, версия 27 (IBM, США). Вид распределения значений количественных признаков (показателей МРТ) определяли с помощью критерия Шапиро–Уилка и визуальной оценки гистограмм. В случае нормального распределения данные представлены в виде $M \pm SD$, где M — среднее значение, а SD — стандартное отклонение. Поскольку у каждого участника демографические и антропометрические характеристики оценивали однократно, а показатели МРТ — неоднократно (на разных сторонах и уровнях), для оценки связей между ними использовали обобщённые линейные смешанные модели. Связь показателей МРТ со стороной измерения оценивали для каждого уровня в отдельности с помощью Т-теста для связанных совокупностей. Связь показателей МРТ с уровнем измерения оценивали для каждой стороны в отдельности с помощью теста ANOVA (Analysis of Variance) для повторных измерений. Для МРТ-показателей, имеющих связь с исследуемыми характеристиками, был проведён многомерный анализ, для которого использовали обобщённые линейные смешанные модели, поскольку демографические и антропометрические характеристики у пациентов оценивали однократно, а МРТ-показатели на разных сторонах и уровнях — неоднократно. Статистически значимыми считали различия и связи при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Участники исследования

Для включения в исследование обследовано 12 человек, из которых один не включён по причине периодически возникающих болей в верхних конечностях. Подписали информированное согласие на участие в исследовании 11, один участник был исключён из исследования в связи с некомфортным для него длительным нахождением внутри томографа. Таким образом, в исследование включены и завершили его 10 человек (6 мужчин и 4 женщины) в возрасте от 24 до 76 лет, (среднее значение возраста 43). Рост участников варьировал от 1,6 до 1,9 м (среднее 1,73), масса тела — от 55 до 92 кг (среднее 72), индекс массы тела — от 19,8 до 31,1 кг/м² (среднее 24). Демографические и антропометрические данные здоровых добровольцев приведены в табл. 1.

Основные результаты исследования

В связи с нормальным распределением количественных МРТ-показателей [исходя из визуальной оценки гистограмм и по критерию Шапиро–Уилка ($p > 0,05$)], для их описания использовали среднее и среднеквадратичное отклонение, дополнительно оценивали диапазон значений (табл. 2).

При анализе связей количественных показателей МРТ с антропометрическими и демографическими характеристиками (табл. 3) выявлена статистически значимая связь T2app с возрастом: чем старше участник, тем выше значение T2app, коэффициент регрессии (В) — 1,062 [95% доверительный интервал (ДИ) 0,370–1,754], $p=0,003$; и ростом: чем выше участник, тем ниже значение T2app, В — -139,742 (95% ДИ -277,161...-2,323), $p=0,046$. Кроме того, отмечена статистически значимая связь ρ с ростом: чем выше участник, тем ниже значение ρ , В — -433,907 (95% ДИ -613,204...-254,611), $p < 0,001$. Анализ не выявил статистически значимых связей MTR и толщины с демографическими и антропометрическими характеристиками.

Таблица 1. Демографические и антропометрические данные здоровых добровольцев

Участник исследования	Пол	Возраст, лет	Рост, м	Масса тела, кг	Индекс массы тела, кг/м ²
№ 1	Мужской	44	1,80	68	21,0
№ 2	Мужской	39	1,72	78	26,4
№ 3	Женский	40	1,62	62	23,6
№ 4	Мужской	41	1,90	75	20,8
№ 5	Женский	26	1,68	56	19,8
№ 6	Мужской	66	1,72	92	31,1
№ 7	Женский	37	1,60	55	21,5
№ 8	Женский	24	1,78	85	26,8
№ 9	Мужской	76	1,67	71	25,5
№ 10	Мужской	35	1,85	80	23,4

Таблица 2. Описательная статистика количественных показателей магнитно-резонансной томографии на разных сторонах и уровнях

Сторона измерения	Измеряемое время T2-релаксации, мс	Протонная плотность	Индекс переноса намагниченности	Толщина, мм
<i>C5 спинномозговой нерв, передняя ветвь</i>				
Справа	122,06±27,51 (94,06–172,71)	457,38±62,50 (379,63–602,57)	38,16±6,03 (30,70–48,90)	3,24±0,67 (2,38–4,60)
Слева	119,94±22,68 (89,83–171,97)	473,98±76,77 (347,24–608,03)	39,74±8,02 (31,46–58,37)	3,18±0,71 (2,25–4,76)
<i>C6 спинномозговой нерв, передняя ветвь</i>				
Справа	134,65±41,98 (100,22–234,73)	447,55±49,04 (369,52–527,61)	41,04±6,99 (29,90–48,33)	4,41±0,43 (3,78–4,95)
Слева	130,77±29,60 (94,64–183,36)	445,60±65,23 (333,53–550,69)	34,19±6,76 (24,70–43,85)	4,22±0,50 (3,18–4,84)
<i>C7 спинномозговой нерв, передняя ветвь</i>				
Справа	132,72±32,49 (85,59–198,50)	457,64±60,91 (362,77–557,97)	36,78±7,25 (23,39–49,07)	4,86±0,46 (3,88–5,45)
Слева	150,25±42,92 (105,40–263,71)	434,56±59,23 (325,94–525,15)	33,30±2,53 (29,26–36,62)	4,97±0,49 (4,12–5,65)
<i>C8 спинномозговой нерв, передняя ветвь</i>				
Справа	141,05±23,11 (101,41–185,02)	477,16±66,89 (342,14–560,16)	39,31±6,25 (31,20–48,85)	4,34±0,39 (3,85–5,06)
Слева	131,86±16,62 (103,11–153,18)	449,33±57,16 (346,74–550,05)	38,33±5,76 (27,26–45,81)	4,26±0,41 (3,68–5,04)
<i>Th1 спинномозговой нерв, передняя ветвь</i>				
Справа	147,06±21,04 (121,16–172,80)	511,84±80,90 (386,88–609,44)	38,11±0,70 (37,25–38,73)	3,39±0,61 (2,60–4,52)
Слева	163,59±20,20 (133,40–191,02)	471,69±70,03 (366,00–579,58)	32,73±6,37 (28,32–40,04)	3,59±0,53 (2,82–4,36)

Примечание. Данные представлены в виде М±SD, где М — среднее значение, а SD — стандартное отклонение. В скобках указаны минимальные и максимальные значения.

Таблица 3. Корреляционные взаимосвязи количественных показателей магнитно-резонансной томографии с антропометрическими и демографическими характеристиками

Связь с показателями	Измеряемое время T2-релаксации, мс	Протонная плотность	Индекс переноса намагниченности	Толщина, мм
Пол	$r=0,744$	$r=0,332$	$r=0,498$	$r=0,293$
Возраст	$r=0,003$	$r=0,301$	$r=0,908$	$r=0,437$
Рост	$r=0,046$	$r<0,001$	$r=0,940$	$r=0,466$
Масса тела	$r=0,698$	$r=0,276$	$r=0,845$	$r=0,553$
Индекс массы тела	$r=0,409$	$r=0,564$	$r=0,835$	$r=0,862$
Уровень	C5	$r=0,798$	$r=0,232$	$r=0,691$
	C6	$r=0,535$	$r=0,143$	$r=0,171$
	C7	$r=0,078$	$r=0,078$	$r=0,270$
	C8	$r=0,204$	$r<0,001$	$r=0,986$
	Th1	$r=0,179$	$r=0,076$	$r=0,611$
Сторона	Справа	$r=0,496$	$r=0,401$	$r=0,451$
	Слева	$r=0,002$	$r=0,525$	$r=0,540$

Примечание. C5–8 — передние ветви 5–8 шейных спинномозговых нервов; Th1 — передние ветви 1 грудных спинномозговых нервов.

При оценке связей количественных показателей МРТ со стороной измерения (см. табл. 3) выявлены статистически значимые различия r справа и слева на уровне передних ветвей 8 шейных (C8) спинномозговых нервов [справа значение

r выше, чем слева: 477,16±66,89 против 449,33±57,16, разница среднего (MD) — 27,83 (95% ДИ 15,57–40,09), $p<0,001$]. Анализ не выявил статистически значимых связей T2app, MTR и толщины со стороной измерения ни на одном из уровней.

При анализе связей количественных показателей МРТ с уровнем измерения (см. табл. 3) как справа, так и слева установлена статистически значимая связь между уровнем и толщиной передних ветвей ($p < 0,001$ в обоих случаях, см. табл. 2). Дополнительно проведены апостериорные попарные сравнения уровней (с поправкой Бонферрони на множественные сравнения). Они показали, что справа статистически значимыми были различия в толщине передних ветвей между C5 и 6 шейными (C6) спинномозговыми нервами [скорректированный уровень значимости (padj)=0,001], C5 и 7 шейными (C7) спинномозговыми нервами (padj =0,001), C5 и C8 (padj =0,007), C7 и C8 (padj =0,020), а также Th1 и C6 спинномозговыми нервами ($\text{padj} < 0,001$), Th1 и C7 ($\text{padj} < 0,001$), Th1 и C8 (padj =0,001). Слева статистически значимыми были различия между C5 и C6 спинномозговыми нервами (padj =0,003), C5 и C7 ($\text{padj} < 0,001$), C5 и C8 (padj =0,010), C6 и C7 (padj =0,009), C7 и C8 (padj =0,030), а также между Th1 и C7 спинномозговыми нервами ($\text{padj} < 0,001$), Th1 и C8 (padj =0,003). Таким образом, отмечали градиент изменения толщины передних ветвей спинномозговых нервов, формирующих плечевые сплетения, с максимальной толщиной на уровне передних ветвей C7 спинномозговых нервов с обеих сторон — увеличение от C5 к C7, после чего последовательное уменьшение на передних ветвях C8 и Th1 спинномозговых нервах.

Кроме того, отмечена статистически значимая связь между уровнем и T2arr слева ($p=0,002$, см. табл. 2), наименьшие значения выявлены на уровне C5 спинномозгового нерва. Апостериорные попарные сравнения показали, что статистически значимые различия были между уровнями C5 и C7 (padj =0,030), а также между C5 и Th1 спинномозговыми нервами (padj =0,010). Анализ не выявил значимых связей ρ и MTR с уровнем измерения ни на одной из сторон.

Таким образом, для MTR не выявлено статистически значимых связей с демографическими и антропометрическими показателями, а также с уровнем и стороной измерения. Для толщины передних ветвей обнаружена статистически значимая связь только с одним из исследуемых показателей — уровнем измерения. В связи с этим многомерный анализ по данным количественных показателей МРТ не проводили.

Напротив, для других показателей МРТ обнаружены статистически значимые связи с несколькими исследуемыми характеристиками: для ρ — с ростом и стороной измерения; для T2arr — с возрастом, ростом и уровнем измерения. Это делает целесообразным многомерный анализ, позволяющий оценить влияние на количественные показатели МРТ всех ассоциированных с ними характеристик. В качестве целевой переменной выступал исследуемый количественный показатель МРТ (ρ или T2arr), в качестве фиксированных факторов — все переменные, продемонстрировавшие статистически значимую связь с этим показателем.

Согласно результатам многомерного анализа, даже с учётом поправки на сторону измерения, сохранено статистически значимое влияние роста на показатель ρ . Значения ρ были ниже у более высоких участников [В — -434,348 (95% ДИ -611,546...-257,150), $p < 0,001$]. В то же время влияние стороны измерения в данной модели было статистически незначимым ($p=0,157$).

Кроме того, по результатам многомерного анализа, даже с учётом поправки на уровень измерения, сохранено статистически значимое влияние роста и возраста на показатель T2arr. Значения T2arr были ниже у более молодых [В — 0,908 (95% ДИ 0,343–1,474), $p=0,002$] и более высоких участников [В — -111,767 (95% ДИ -205,520...-18,013), $p=0,020$]. Влияние уровня измерения в данной модели также сохраняло статистическую значимость ($p=0,001$).

Таким образом, результаты анализа позволяют предположить влияние возраста и роста на T2arr, а также влияние роста на ρ .

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

Представленное исследование является первым пилотным комплексным исследованием показателей T2-релаксометрии и MTR в элементах плечевых сплетений и их зависимости от демографических и антропометрических данных. В результате проведённого анализа данных выявлены связи T2arr с возрастом и ростом и ρ с ростом. По нашему мнению, наиболее значимым результатом настоящего исследования является обнаруженная прямая связь T2arr с возрастом.

Обсуждение основного результата исследования

Согласно проведённому поиску публикаций, работы по T2-картированию плечевых сплетений единичны [18, 19], группы здоровых добровольцев в них составили 10 и 5 человек соответственно. M.H.J. van Rosmalen и соавт. [18] также проводили корреляционный анализ и обнаружили связь показателей с возрастом, что согласуется с полученными в представленном исследовании данными. Результаты исследования T2arr вещества головного мозга также согласуются с данными настоящего исследования. Так, увеличение T2arr с возрастом наблюдали в различных областях головного мозга, кроме скорлупы и вентральных отделов моста [23]. Кроме того, T2arr растёт с увеличением количества свободной воды, что происходит при нормальном старении за счёт уменьшения с возрастом количества аксонов и истончения миелиновой оболочки, что, в свою очередь, приводит к уменьшению количества макромолекул и увеличению количества свободной воды, а также уменьшению их взаимодействия друг с другом [24]. R. Kumar и соавт. [23]

выявили различия T2arr в головном мозге у мужчин и женщин, что авторы связали с различным депонированием парамагнитных веществ у участников исследования разного пола. В настоящей работе подобных различий не выявлено, что можно связать как с отсутствием в норме депонирования парамагнитных веществ в периферических нервах, так и с небольшим количеством обследованных добровольцев.

Что касается обнаруженной обратной связи T2arr и ρ с ростом участников исследования, маловероятно, что она имеет биологическое основание, полученные зависимости требуют дополнительных исследований указанных параметров на большей выборке.

В исследовании, проведённом на периферических нервах конечностей (седалищных, большеберцовых, срединных, лучевых, локтевых), при анализе взаимосвязей параметров T2-релаксометрии с возрастом, ростом, массой тела и индексом массы тела [25] не выявлено статистически значимых ассоциаций T2arr с указанными параметрами при объединённой оценке всех нервов. В то же время ρ демонстрировала обратную корреляцию с массой тела и её индексом, тогда как в нашем исследовании подобная тенденция не достигла статистической значимости, что, вероятно, обусловлено меньшим числом участников исследования и требует проверки на большей выборке. При индивидуальном анализе показателей по нервам только на уровне седалищного нерва отмечена статистически значимая обратная корреляция ρ с возрастом [25], что не согласуется с данными настоящей работы и может быть связано с отличиями в применяемой последовательности, локализации измерений либо со случайной ошибкой, поскольку является единственной значимой связью из всей серии наблюдений.

В передних ветвях на уровне C5 спинномозговых нервов слева T2arr отличалось от соответствующего параметра на остальных уровнях. Наличие анатомических и морфологических различий передних ветвей спинномозговых нервов представляется сомнительным. Можно предположить, что в данном случае может играть роль эффект магического угла, когда T2-сигнал повышается при расположении структуры под более острым углом к линиям напряжённости магнитного поля, что как раз может происходить с передними ветвями C5 спинномозговых нервов. Подобные корреляции между углом прохождения нерва и T2arr описали G.J. Campbell и соавт. [26], при изучении нервов верхней конечности. В настоящем исследовании специальную оценку угла отклонения передних ветвей от линий напряжённости магнитного поля B0 не проводили и, возможно, она должна стать предметом дальнейших исследований.

Отсутствие статистически значимых связей MTR с демографическими и антропометрическими показателями в настоящем исследовании соответствует результатам

работы J. Kollmer и соавт. [27], где также не обнаружено различий MTR в зависимости от уровня измерения и связи с полом, массой тела, ростом и индексом массы тела на нервах нижних конечностей. Однако при объединении MTR седалищного и большеберцового нервов по всем уровням измерения отмечены статистически значимые различия между группой старших и молодых участников исследования, тем не менее при сравнении этих групп отдельно по локализациям различия не достигли статистической значимости [27]. Таким образом, данные этой работы на периферических нервах нижних конечностей полностью согласуются с результатами настоящего исследования.

Выявленный градиент толщины передних ветвей спинномозговых нервов, формирующих плечевые сплетения, подтверждает ранее приводимые анатомами и хирургами данные [10, 12], подобных измерений с помощью МРТ не проводили. Обнаружение наибольшей толщины у передней ветви C7 спинномозгового нерва представляется логичным в свете самостоятельного формирования данной ветвью отдельного ствола, у некоторых участников исследования ширина её превышала 5 мм. По нашему мнению, данные результаты, а именно соблюдение или не соблюдение градиента изменения толщины нервных элементов, следует учитывать при оценке плечевых сплетений у пациентов.

Ограничения исследования

Основным ограничением представленного исследования является небольшой объём выборки ($n=10$), что связано прежде всего с его пилотным характером. Ограничением анализа является потенциально невысокая мощность из-за небольшого объёма выборки и низкой чувствительности сложных методов. В связи с этим результаты требуют дальнейшей проверки на большей выборке для использования при обследовании пациентов с патологией плечевых сплетений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учитывать возраст и рост при проведении дальнейших исследований количественных параметров МРТ как у здоровых людей, так и у пациентов с различными патологиями плечевых сплетений. Кроме того, при измерении толщины передних ветвей плечевых сплетений с использованием стандартных последовательностей целесообразно учитывать не только размеры нервных элементов, но и оценивать соблюдение градиента их толщины.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.Н. Морозова — определение концепции, проведение исследования, работа с данными, визуализация, написание черновика рукописи; В.В. Синькова — проведение исследования; В.А. Орлов,

С.И. Карташов — программное обеспечение, работа с данными; С.С. Ханина, А.А. Пойда — программное обеспечение, работа с данными, валидация; Д.А. Гришина — проведение исследования, пересмотр и редактирование текста рукописи; Н.А. Супонева, М.В. Кротенкова — пересмотр и редактирование текста рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты настоящей работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Протокол исследования одобрен локальным этическим комитетом Российского центра неврологии и нейронаук (протокол № 1-3/22 от 19.01.2022). Все потенциальные участники подписывали информированное добровольное согласие на участие в исследовании.

Источники финансирования. Определение цели и разработка дизайна исследования, обследование здоровых добровольцев, распределение данных нейровизуализации, разметка обработанных изображений и фиксация параметров, статистическая обработка полученных количественных данных выполнены в рамках государственного задания ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук» по теме «Восстановление и адаптация больных с повреждением нервной системы: современные возможности изучения механизмов, практико-ориентированные подходы» (ЕГИСУ: №122041800162-9). Разработка алгоритма обработки данных и программы для получения количественных МРТ-параметров, обработка экспериментальных нейровизуализационных данных выполнены в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» по теме «Фундаментальные междисциплинарные исследования в области создания природоподобных технологий» (ЕГИСУ: 123061500011-0).

Раскрытие интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения.

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два члена редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: S.N. Morozova: conceptualization, investigation, data curation, visualization, writing—original draft; V.V. Sinkova: investigation; V.A. Orlov, S.I. Kartashov: software, data curation; S.S. Khanina, A.A. Poyda: software, data curation, validation; D.A. Grishina: investigation, writing—review & editing; N.A. Suponeva, M.V. Krotchenkova: writing—review & editing, supervision, project administration. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: The study protocol was approved by the local Ethics Committee of the Russian Center of Neurology and Neurosciences (Minutes No. 1-3/22, dated January 19, 2022). All eligible participants provided written informed consent to participate in the study.

Funding sources: The definition of the aim and development of the study design, examination of healthy volunteers, distribution of neuroimaging data, labeling of processed images and recording of parameters, statistical processing of the obtained quantitative data were carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Russian Center for Neurology and Neurosciences" on the topic "Recovery and adaptation of patients with damage to the nervous system: modern possibilities for studying mechanisms, practice-oriented approaches" (EGISU: No. 122041800162-9). The development of a data processing algorithm and a program for obtaining quantitative MRI parameters, and the processing of experimental neuroimaging data were carried out within the framework of the state assignment of the National Research Center "Kurchatov Institute" on the topic "Fundamental interdisciplinary research in the field of creating nature-like technologies" (EGISU: 123061500011-0).

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer-review: This article was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers and a member of the Editorial Board.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Varakin YuY, Gornostaeva GV, Manvelov LS, et al. Clinical and Epidemiological Study of the Nervous System Diseases According to Screening of the Open Population. *Annals of Clinical and Experimental Neurology*. 2012;6(1):6–13. EDN: OZIQKV
- Hamm C, Yeung B. *Neuropathy* [Internet]. Treasure Island: StatPearls Publishing; 2023 [cited 2024 Oct 13]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK542220/>
- Piradova MA, Suponeva NA, Grishina DA. *Polyunsaturates: Algorithms of Diagnostic and Treatment*. Moscow: Goryachaya Liniya-Telekom; 2019. ISBN: 978-5-9912-0818-5 EDN: MGPDWV
- Piradov MA, Suponeva NA, Grishina DA, Pavlov YeV. *Electroneuromyography: Algorithms and Recommendations in Polyneuropathies*. Moscow: Goryachaya Liniya-Telekom; 2021. (In Russ.) Available from: <https://www.libex.ru/detail/book1110605.html>
- Mansurova AV, Chechetkin AO, Suponeva NA, et al. Possibilities of Ultrasound in the Diagnosis and Differential Diagnosis of Amyotrophic Lateral Sclerosis: A Literature Review. *Neuromuscular Diseases*. 2022;12(1):21–28. doi: 10.17650/2222-8721-2022-12-1-21-28 EDN: DLPSAU
- Morozova SN, Sinkova VV, Grishina DA, et al. Conventional Magnetic Resonance Imaging of Peripheral Nerves: MR-neurography. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):356–368. doi: 10.17816/DD430292 EDN: YHMUGC
- Kollmer J, Bendszus M. Magnetic Resonance Neurography: Improved Diagnosis of Peripheral Neuropathies. *Neurotherapeutics*. 2021;18(4):2368–2383. doi: 10.1007/s13311-021-01166-8 EDN: SQEUAU
- Joint Task Force of the EFNS and the PNS. European Federation of Neurological Societies/Peripheral Nerve Society Guideline on management of multifocal motor neuropathy. Report of a Joint Task Force of the European Federation of Neurological Societies and the Peripheral Nerve Society – first revision. *Journal of the Peripheral Nervous System*. 2010;15(4):295–301. doi: 10.1111/j.1529-8027.2010.00290.x
- Van den Bergh PYK, van Doorn PA, Hadden RDM, et al. European Academy of Neurology/Peripheral Nerve Society Guideline on Diagnosis and Treatment of Chronic Inflammatory Demyelinating Polyradiculoneuropathy: Report of a joint Task Force—Second revision. *Journal of the Peripheral Nervous System*. 2021;26(3):242–268. doi: 10.1111/jns.12455 EDN: WSXBSA
- Gorbunov NS, Rostovtsev SI, Samotesov PA, et al. To the Problem of the Brachial Plexus Structure: Modern Views in Surgery. *Siberian Medical Review*. 2020;(2):13–19. doi: 10.20333/2500136-2020-2-13-19 EDN: USHKTW
- Tazawa K, Matsuda M, Yoshida T, et al. Spinal Nerve Root Hypertrophy on MRI: Clinical Significance in the Diagnosis of Chronic Inflammatory Demyelinating Polyradiculoneuropathy. *Internal Medicine*. 2008;47(23):2019–2024. doi: 10.2169/internalmedicine.47.1272

12. Lapegue F, Faruch-Bilfeld M, Demondion X, et al. Ultrasonography of the Brachial Plexus, Normal Appearance and Practical Applications. *Diagnostic and Interventional Imaging*. 2014;95(3):259–275. doi: 10.1016/j.diii.2014.01.020
13. van Rosmalen MHJ, Goedee HS, van der Gijp A, et al. Low Interrater Reliability of Brachial Plexus MRI in Chronic Inflammatory Neuropathies. *Muscle & Nerve*. 2020;61(6):779–783. doi: 10.1002/mus.26821 EDN: XHIEVZ
14. Snyder J, Seres P, Stobbe RW, et al. Inline Dual-echo T2 Quantification in Brain Using a Fast Mapping Reconstruction Technique. *NMR in Biomedicine*. 2022;36(1):e4811. doi: 10.1002/nbm.4811 EDN: APLIQD
15. York EN, Thrippleton MJ, Meijboom R, et al. Quantitative Magnetization Transfer Imaging in Relapsing-Remitting Multiple Sclerosis: A Systematic Review and Meta-analysis. *Brain Communications*. 2022;4(2):fcac088. doi: 10.1093/braincomms/fcac088 EDN: ZJORSA
16. Davies GR, Ramani A, Dalton CM, et al. Preliminary Magnetic Resonance Study of the Macromolecular Proton Fraction in White Matter: A Potential Marker of Myelin? *Multiple Sclerosis Journal*. 2003;9(3):246–249. doi: 10.1191/1352458503ms9110a EDN: SRJATL
17. Does MD, Beaulieu C, Allen PS, Snyder RE. Multi-component T1 Relaxation and Magnetisation Transfer in Peripheral Nerve. *Magnetic Resonance Imaging*. 1998;16(9):1033–1041. doi: 10.1016/S0730-725X(98)00139-8
18. van Rosmalen MHJ, Goedee HS, Derks R, et al. Quantitative Magnetic Resonance Imaging of the Brachial Plexus Shows Specific Changes in Nerve Architecture in Chronic Inflammatory Demyelinating Polyneuropathy, Multifocal Motor Neuropathy and Motor Neuron Disease. *European Journal of Neurology*. 2021;28(8):2716–2726. doi: 10.1111/ene.14896 EDN: YLTTHE
19. Hiwatashi A, Togao O, Yamashita K, et al. Simultaneous MR Neurography and Apparent T2 Mapping in Brachial Plexus: Evaluation of Patients With Chronic Inflammatory Demyelinating Polyradiculoneuropathy. *Magnetic Resonance Imaging*. 2019;55:112–117. doi: 10.1016/j.mri.2018.09.025
20. Kollmer J, Hund E, Hornung B, et al. In vivo Detection of Nerve Injury in Familial Amyloid Polyneuropathy by Magnetic Resonance Neurography. *Brain*. 2014;138(3):549–562. doi: 10.1093/brain/awu344
21. Kollmer J, Kessler T, Sam G, et al. Magnetization Transfer Ratio: A Quantitative Imaging Biomarker for 5q Spinal Muscular Atrophy. *European Journal of Neurology*. 2020;28(1):331–340. doi: 10.1111/ene.14528 EDN: YQNGSZ
22. Grossman RI, Gomori JM, Ramer KN, et al. Magnetization Transfer: Theory and Clinical Applications in Neuroradiology. *RadioGraphics*. 1994;14(2):279–290. doi: 10.1148/radiographics.14.2.8190954
23. Kumar R, Delshad S, Woo MA, et al. Age-related Regional Brain T2-relaxation Changes in Healthy Adults. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2011;35(2):300–308. doi: 10.1002/jmri.22831
24. Bartzokis G, Lu PH, Tingus K, et al. Lifespan Trajectory of Myelin Integrity and Maximum Motor Speed. *Neurobiology of Aging*. 2010;31(9):1554–1562. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2008.08.015 EDN: NZQYKL
25. Kronlage M, Schwehr V, Schwarz D, et al. Magnetic Resonance Neurography. *Clinical Neurophysiology*. 2017;29(1):19–26. doi: 10.1007/s00062-017-0633-5 EDN: BZSNKR
26. Campbell GJ, Sneag DB, Queler SC, et al. Quantitative Double Echo Steady State T2 Mapping of Upper Extremity Peripheral Nerves and Muscles. *Frontiers in Neurology*. 2024;15:1359033. doi: 10.3389/fneur.2024.1359033 EDN: FOXUNW
27. Kollmer J, Kästel T, Jende JME, et al. Magnetization Transfer Ratio in Peripheral Nerve Tissue. *Investigative Radiology*. 2018;53(7):397–402. doi: 10.1097/RLI.0000000000000455

ОБ АВТОРАХ

* **Морозова Софья Николаева**, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 125367, Москва, Волоколамское ш., д. 80;
ORCID: 0000-0002-9093-344X;
eLibrary SPIN: 2434-7827;
e-mail: morozova@neurology.ru

Синькова Виктория Викторовна;
ORCID: 0000-0003-2285-2725;
eLibrary SPIN: 2949-2821;
e-mail: 000564321@mail.ru

Орлов Вячеслав Андреевич, канд. физ.-мат. наук;
ORCID: 0000-0002-4840-4499;
eLibrary SPIN: 5167-6342;
e-mail: orlov_va@nrcki.ru

Карташов Сергей Иванович;
ORCID: 0000-0002-0181-3391;
eLibrary SPIN: 1508-9120;
e-mail: mail@kartashovs.ru

Пойда Алексей Анатольевич, канд. физ.-мат. наук;
ORCID: 0000-0002-7660-6215;
eLibrary SPIN: 6870-2764;
e-mail: Poyda_AA@nrcki.ru

Ханина Сандаара Светозаровна;
ORCID: 0009-0002-7136-3434;
eLibrary SPIN: 2452-3210;
e-mail: sandaara.khan@mail.ru

Гришина Дарья Александровна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-7924-3405;
eLibrary SPIN: 6577-1799;
e-mail: dgrishina82@gmail.com

AUTHORS' INFO

* **Sofya N. Morozova**, MD, Cand. Sci. (Medicine);
address: 80 Volokolamskoe hwy, Moscow, Russia, 125367;
ORCID: 0000-0002-9093-344X;
eLibrary SPIN: 2434-7827;
e-mail: morozova@neurology.ru

Viktoriya V. Sinkova, MD;
ORCID: 0000-0003-2285-2725;
eLibrary SPIN: 2949-2821;
e-mail: 000564321@mail.ru

Vyacheslav A. Orlov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics);
ORCID: 0000-0002-4840-4499;
eLibrary SPIN: 5167-6342;
e-mail: orlov_va@nrcki.ru

Sergey I. Kartashov;
ORCID: 0000-0002-0181-3391;
eLibrary SPIN: 1508-9120;
e-mail: mail@kartashovs.ru

Alexey A. Poyda, Cand. Sci. (Physics and Mathematics);
ORCID: 0000-0002-7660-6215;
eLibrary SPIN: 6870-2764;
e-mail: Poyda_AA@nrcki.ru

Sandaara S. Khanina;
ORCID: 0009-0002-7136-3434;
eLibrary SPIN: 2452-3210;
e-mail: sandaara.khan@mail.ru

Darya A. Grishina, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-7924-3405;
eLibrary SPIN: 6577-1799;
e-mail: dgrishina82@gmail.com

Супонева Наталья Александровна, д-р мед. наук, профессор,
член-корреспондент РАН;
ORCID: 0000-0003-3956-6362;
eLibrary SPIN: 3223-6006;
e-mail: nasu2709@mail.ru

Кротенкова Марина Викторовна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0003-3820-4554;
eLibrary SPIN: 9663-8828;
e-mail: krotenkova_mrt@mail.ru

Natalia A. Suponeva, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor,
Corresponding member of the Russian Academy of Sciences;
ORCID: 0000-0003-3956-6362;
eLibrary SPIN: 3223-6006;
e-mail: nasu2709@mail.ru

Marina V. Krotenkova, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0003-3820-4554;
eLibrary SPIN: 9663-8828;
e-mail: krotenkova_mrt@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author