

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

Основы стандартной визуализации периферической нервной системы: МР-нейрография

С.Н. Морозова, В.В. Синькова, Д.А. Гришина, Т.А. Тумилович, А.О. Четкин,
М.В. Кротенкова, Н.А. Супонева

Научный центр неврологии, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Периферические нейропатии относятся к одним из наиболее часто встречающихся неврологических расстройств. Несмотря на наличие хорошо зарекомендовавших себя и дополняющих друг друга методов инструментальной диагностики, таких как электронейромиография и ультразвуковое исследование, диагностика и дифференциальная диагностика поражения периферических нервов различного генеза, особенно их проксимальных отделов, может быть затруднена. Магнитно-резонансная томография периферических нервов в настоящее время активно внедряется в клиническую практику в качестве ценного дополнительного диагностического инструмента.

Акцент в представленной работе делается на основных преимуществах и ограничениях упомянутых методов исследования, истории использования магнитно-резонансной томографии для визуализации структур периферической нервной системы, основных требованиях к протоколу магнитно-резонансной томографии периферических нервов различной локализации с учётом современных технических возможностей, в том числе подробно рассматриваются используемые для стандартного исследования последовательности магнитно-резонансной томографии и их диагностическое значение, рекомендации по использованию контрастирования, преимущества и недостатки различных механизмов жироводавления.

В настоящее время практически отсутствуют стандартизированные описания периферических нервов в норме и при различных патологиях, что снижает диагностическую ценность метода. Перспектива повышения его информативности и расширения использования связана, в том числе, с проведением исследований на больших группах здоровых испытуемых и пациентов с различными патологиями периферической нервной системы.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография; периферические нейропатии; МРТ-протокол; жироводавление; трёхмерная визуализация.

Как цитировать:

Морозова С.Н., Синькова В.В., Гришина Д.А., Тумилович Т.А., Четкин А.О., Кротенкова М.В., Супонева Н.А. Основы стандартной визуализации периферической нервной системы: МР-нейрография // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 356–368. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

Conventional magnetic resonance imaging of peripheral nerves: MR-neurography

Sofya N. Morozova, Viktoriya V. Sinkova, Darya A. Grishina, Taisiya A. Tumilovich, Andrey O. Chechetkin, Marina V. Krotenkova, Natalya A. Suponeva

Research Center of Neurology, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Peripheral neuropathy is known to be one of the most common neurological disorders. Despite the great diagnostic value of electroneuromyography and ultrasound, addressing the diagnostics and differential diagnostics of peripheral nerve diseases of different origin could be challenging. In recent years, magnetic resonance tomography has been increasingly used for evaluating cases of suspected or established peripheral neuropathy with excellent results.

This manuscript mainly deals with the advantages and limitations of the aforementioned diagnostic instruments, technical considerations according to different anatomy of peripheral nerves, along with state-of-the-art technical decisions, frequently used magnetic resonance imaging sequences and their diagnostic value based on own observation, and recommendations for contrast enhancement use and different methods of fat suppression.

Currently, there is practically no standardized description of normal magnetic resonance imaging features of peripheral nerves, as well as their changes in different diseases. The evaluation of images is mainly based on the radiologist experience, which obviously decreases method's diagnostic value. Studies of large numbers involving healthy volunteers and patients with peripheral neuropathies of different origin are required to address this issue.

Keywords: magnetic resonance imaging; peripheral nervous system diseases; MRI scans; fat suppression; imaging; three-dimensional.

To cite this article:

Morozova SN, Sinkova VV, Grishina DA, Tumilovich TA, Chechetkin AO, Krotenkova MV, Suponeva NA. Conventional magnetic resonance imaging of peripheral nerves: MR-neurography. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):356–368. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

Received: 17.05.2023

Accepted: 04.07.2023

Published: 24.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

外周神经系统标准成像基础：磁共振神经成像

Sofya N. Morozova, Viktoriya V. Sinkova, Darya A. Grishina, Taisiya A. Tumilovich, Andrey O. Chechetkin, Marina V. Krotenkova, Natalya A. Suponeva

Research Center of Neurology, Moscow, Russian Federation

简评

周围神经病是最常见的神经系统疾病之一。虽然已经有了完善的辅助仪器诊断方法，如神经肌电描记术和超声检查，但对各种原因引起的周围神经损坏，尤其是其近端损坏的诊断和鉴别诊断仍很困难。目前，外周神经的磁共振成像已被积极引入临床实践，成为一种宝贵的辅助诊断工具。

本文重点介绍上述检查方法的主要优点和局限性、使用磁共振成像来显示出周围神经系统结构的历史、考虑到现代技术能力的不同定位周围神经磁共振成像协议书的主要要求，包括对标准检查中使用的磁共振成像序列及其诊断价值、使用造影剂的建议以及各种脂肪抑制机制的优缺点的详细讨论。

目前，对正常和各种病变下的周围神经几乎没有标准化的描述，这降低该方法的诊断价值。为了提高该方法的信息量并扩大其应用范围，还需要对大量健康受试者和患有各种外周神经系统疾病的患者进行研究。

关键词：磁共振成像；周围神经病；磁共振成像协议书；脂肪抑制；三维成像。

引用本文：

Morozova SN, Sinkova VV, Grishina DA, Tumilovich TA, Chechetkin AO, Krotenkova MV, Suponeva NA. 外周神经系统标准成像基础：磁共振神经成像. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):356–368. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

收到: 17.05.2023

接受: 04.07.2023

发布日期: 24.08.2023

绪论

周围神经病是一组周围神经纤维受影响的疾病，是最常见的神经系统疾病之一[1]。根据受累神经的数量，这种疾病可分为单神经病变、多发性单神经病变和多发性神经病变。周围神经病的病因多种多样，包括遗传性和获得性（压迫缺血性、创伤后、感染性、肿瘤性、代谢异常性、免疫异常性、中毒性、缺损性等）[2, 3]。

如果怀疑是周围神经病变，诊断时需要仔细收集主诉和病史，包括家族史，并进行详细的神经系统检查[4]。实验室检查在大多数情况下可以确定神经病变的病因。在辅助仪器检查中，目前的金标准是神经肌电图检查，它可以评估上下肢运动神经和敏感神经的传导功能，并间接评估其近端部分，还可以评估神经支配肌肉的状态（去神经支配活性）[5]。这些检查的结果通常允许确定病变的位置、分布量、程度和类型[6, 7]。

然而，电生理检查有一些局限性，例如，当病理过程发生在外周神经系统的近端部分时难以诊断，而神经传导检查又很难到达这些部位[8]。此外，在急性和慢性周围神经病中，在较早出现远端部分病变的情况下，往往在患者首次就诊时就已出现明显的变性，这也使诊断变得复杂（出现所谓的floor effect，即该方法能可靠显示的数据值的有限极限）[3]。出于同样的原因，对远端神经节段的完全横断面损伤和更近端周围神经束的部分损伤之间的鉴别诊断也存在疑问[9]。一个重要的限制因素也是神经肌电图检查结果取决于医生的经验。这就是所谓的方法的操作依赖性。

高分辨率超声是诊断周围神经结构病变的一种辅助性、高信息量方法，这种检查提供远距离实时评估周围神经结构、测量神经横截面积、识别神经内变化和评估神经周围组织的能力[10, 11]。目前，外周神经超声检查被广泛应用于创伤后、压迫性、免疫异常性和遗传性神经病变以及占位性神经肿块的诊断中[12]。然而，这种方法的有效性和可重复性在很大程度上取决于进行检查的医生的经验[13]，以及所使用的超声设备类别和换能器频率。与电生理检查方法不同，这种技术无法确定神经纤维病变的类型。此外，靠近骨骼结构和内脏器官的深层周围神经可能不易被超声波发现或无法接触[14]。

磁共振成像（MRI）在诊断外周神经系统疾病方面的应用还不够广泛。其主要原因有以下几点：首先，需要获得分辨率极高的三维图像，以发现神经结构的形态变化。这就增加检查时间，并使获得的图像更容易受到伪影的影响。其次，对周围神经系统成像时的规范描述不足，这使得对所获数据的解释变得复杂。然而，考虑到过去几十年的技术成就，磁共振成像被认为是诊断周围神经病变的替代方法，可被用于怀疑传统方法难以触及的局部病理变化、手术干预计划、神经肌电图检查和超声波数据不明确的情况，以及创伤、放射治疗和手术干预病例[15]。

磁共振成像被用于外周神经系统成像的历史

目前，磁共振成像多被用于疑似周围神经病变的患者，以排除神经内部或紧邻神经的占位性肿块[16]。然而，早在20世纪90年代初，由A.G.Filler和F.A.Howe领导的一组科学家[17, 18]开发出了第一批具有更高的空间分辨率和更高的周围神经对比度的磁共振序列，从而实现了对外周神经的最佳成像。与此同时，“磁共振神经成像”（magnetic resonance neurography, MRN）一词也被引入临床实践。

在临床实践中，MRN技术开始被用于创伤性神经损伤和隧道综合症的辅助诊断和治疗计划。在第一种情况下，MRN可将神经完全断裂（所有结缔组织支持结构都受损，需要手术干预）（神经断伤）与轴索损伤（膜未受损）（轴索断伤）区分开来，或者与因压迫或牵引而导致的局部脱髓鞘（轴索结构保留，有可能自发恢复）（神经失用症）区分开来[19]。MRN也可被用于监测有争议病例的神经恢复情况。该技术通常被用于确定隧道综合征（压迫性神经病变）的确切损伤部位。磁共振神经成像的适应症也可能是手术治疗效果不理想。

专家正在积极开展与周围神经系统其他疾病有关的研究[3]。因此，神经丛磁共振成像已被纳入慢性炎症性脱髓鞘性多发性神经病和多灶性运动神经病的辅助诊断标准[20, 21]。该技术的优点是非侵入性、对进行操作者依赖性低、能够确定病理变化的确切位置及其与邻近解剖结构的明确相关性、全面评估检查区域的所有解剖结构、可进行图像修改和动态检查。

检查协议的基本技术要求

磁共振神经成像是一种利用神经选择性（在周围组织和血管信号抑制的背景下显示神经干的图像）[22]）和神经非选择性序列来优化周围神经可视化的技术，具有高分辨率和对比度。

这项检查遇到一些困难。首先，由于正常情况下神经的横向尺寸仅为几毫米，而单个神经束的厚度约为1mm或更少，因此显示出单个神经干需要高分辨率的图像。获取此类图像需要较长的检查时间和较低的信噪比。此外，神经结构周围和内部脂肪组织的存在也使周围神经系统结构的定性和定量评估变得复杂。因此，我们采用了各种脂肪抑制机制来显示出它们。这些脂肪抑制机制本身会影响图像评估并降低信噪比。某些周围神经的解剖走向复杂，需要使用三维序列。三维序列的主要缺点是血管信号的叠加。在这方面，图像可能会变得噪声和颗粒的。尽管如此，外周神经系统的磁共振成像目前仍在积极发展中[23, 24]。

如果使用磁场感应为3T的设备进行检查，就有可能获得足够的空间分辨率来显示出神经内的单个神经纤维束[3]。它们的信噪比更高。这样可以获得更高的对比度、更高的扫描平面分辨率和

最小的切片厚度。最小切片厚度为二维序列提供更高的通面分辨率，为三维序列提供更高的各向同性分辨率[25]。不过，也可以使用1.5T的断层扫描仪。此外，在对扫描区域内有金属植入物的患者进行成像时，它们可能具有优势[26]。

评估平面的空间分辨率应不低于 $0.1-0.4 \times 0.1-0.4\text{mm}$ ，以最大限度地减少部分容积效应，并显示出单个神经结构以及位于其间的疏松结缔组织和脂肪组织，二维序列的切片厚度对于神经而言不应超过 $2-3.5\text{mm}$ ，对于肢体而言不应超过 $4-5\text{mm}$ ，切片间隙应最小或没有间隙[3, 25]。二维序列仍是初步评估的标准。如果神经的解剖走向非常复杂，并可用数据也不明确，三维序列（可在不同平面重建图像）对于可视化和解决问题至关重要。切片应尽可能相对于长轴进行标记，即平行或垂直于肢体或神经走向[25]。

针对特定身体部位使用多通道线圈可获得最佳成像效果。不过，也可以采用其他解决方案。只要患者的身体部位位置正确，就可以用现有的线圈替代缺失的线圈。专用的多通道加速器线圈可以辅以软表面线圈，以扩大视野；建议在躯干水平结合使用脊柱集成线圈和软表面线圈[27]。

在计划检查之前，应考虑最大可能的覆盖面积，检查时间随切片数量的增加而延长。为了获得更高的空间分辨率，应尽可能缩小视野，待检查区域周围的空隙不应超过其大小的20%，以便对小直径神经进行最佳评估[25]。

为减少运动伪影，还必须为患者提供正确舒适的体位[3]。在检查腰椎和骶神经丛之前，应先排空膀胱。这有助于避免膀胱信号与最大密度投影（maximum intensity projection, MIP）重建重叠。

标准MRN技术及其临床应用

在常规临床实践中，最常进行的是T1和T2加权图像以及质子密度加权图像的定性评估。此类图像的对比如基于人体组织的T1和T2弛豫和质子密度。同时，使用的是自旋或梯度回波序列。专家使用各种脂肪抑制技术来减少脂肪组织的信号，以便观察肿胀成像和对比后成像。下文将详细讨论这些技术的具体细节。无论检查领域如何，建议至少进行两个平面的扫描，最好至少使用一个三维序列。

T1加权图像

这些图像对神经成像至关重要，可使用自旋回波或反转恢复序列进行采集，在轴向平面采集肢体神经的游离液信号抑制，在冠状面采集神经丛的游离液信号抑制。二维成像的回波链长度从3到8不等，三维成像的回波链长度从33到68不等。扫描平面的分辨率为 0.3 至 0.4mm ，可完美显示出神经内脂肪、增厚的神经外膜和因占位性肿块或纤维化而消失的神经周围脂肪（图1）[28]。此外，这些图像对于评估脂肪浸润和肌肉萎缩的程

度也是不可或缺的。它们对运动伪影和磁敏感伪影的灵敏度也较低，通常可以检测到肿胀、神经走向中断或因压迫导致的神经横截面结构变化[3]。

对比剂磁共振神经成像

对于对比前和对比后的成像扫描，建议使用T1加权三维梯度回波序列，抑制脂肪组织信号，并可能随后对获取的图像进行减影。在其他情况下，由于其易受伪影的程度较高且对比度较低，因此在三维成像中的应用受到限制。

由于存在血神经屏障，静脉注射造影剂后，来自完整神经的信号不会发生改变[24]。对于创伤性病变或隧道综合症，造影剂的诊断价值不大，因为通常在亚急性期对这些病症进行磁共振成像检查。在这些病理情况下，只有去神经支配的肌肉能被对比出来，但在对液体信号敏感的脂肪抑制图像上，这些肌肉能被很好地显示出来[25]。在遗传性多发性神经病和脱髓鞘性多发性神经病中，对比度与神经信号的变化相关，也没有什么作用。

在其他情况下，如怀疑有神经或神经周围占位性肿块、淋巴瘤、神经周围感染性炎症过程和其他会破坏血神经屏障的病变，可建议使用造影剂进行检查[29]。除上述病变外，减压手术后如果临床症状持续存在，也可使用造影剂增强检查，以排除纤维组织增生[30]。

目前正在开发神经特异性造影剂，例如在脱髓鞘区域选择性蓄积，随着纤维再生，选择性蓄积逐渐减少，但这些技术尚未被批准用于临床[24]。

T2加权图像

早期的观察结果表明了，T2加权图像是诊断周围神经损伤最重要的方法[31]。无脂肪抑制的序列（通常为二维）能很好地显示出神经外膜（图2）。抑制脂肪组织的信号可以区分神经和周围脂肪组织相对较高的信号。对于无脂肪抑制的T2加权图像，建议回波时间大于 90ms ，最好为 $100-105\text{ms}$ 。对于有脂肪抑制信号的序列，回波时间可缩短至 $60-80\text{ms}$ 。这些序列也被称为流体敏感图像，可提供理想的神经可视化（图3），病变区域的信号会增强[32]。脂肪抑制技术是基于水和脂肪进动频率的差异，以及脂肪组织与肌肉组织或神经纤维相比T2弛豫时间较长、T1弛豫时间较短的特点[2]。

T2加权自旋回波序列中的频率选择性脂肪抑制（FatSat——fat saturation）可有助于脂肪组织所需的信号减弱；它们具有固有的高对比度，几乎没有脉动伪影，磁敏感伪影也不明显[33]。不过，如果视野中存在金属结构，则应避免使用这种方法。不过，最大的缺点是对视野中心以外的脂肪抑制较差，或者对身体曲线的脂肪抑制不均匀[25]。

短反转时间反转恢复序列（STIR: short-TI inversion recovery，其中TI是以ms为单位的反转时间）可在不同的磁感应强度和磁场均匀度下实现出色的均匀脂肪抑制。不过，它只能提供非选择性脂肪抑制（除了脂肪，它还能抑制T1较

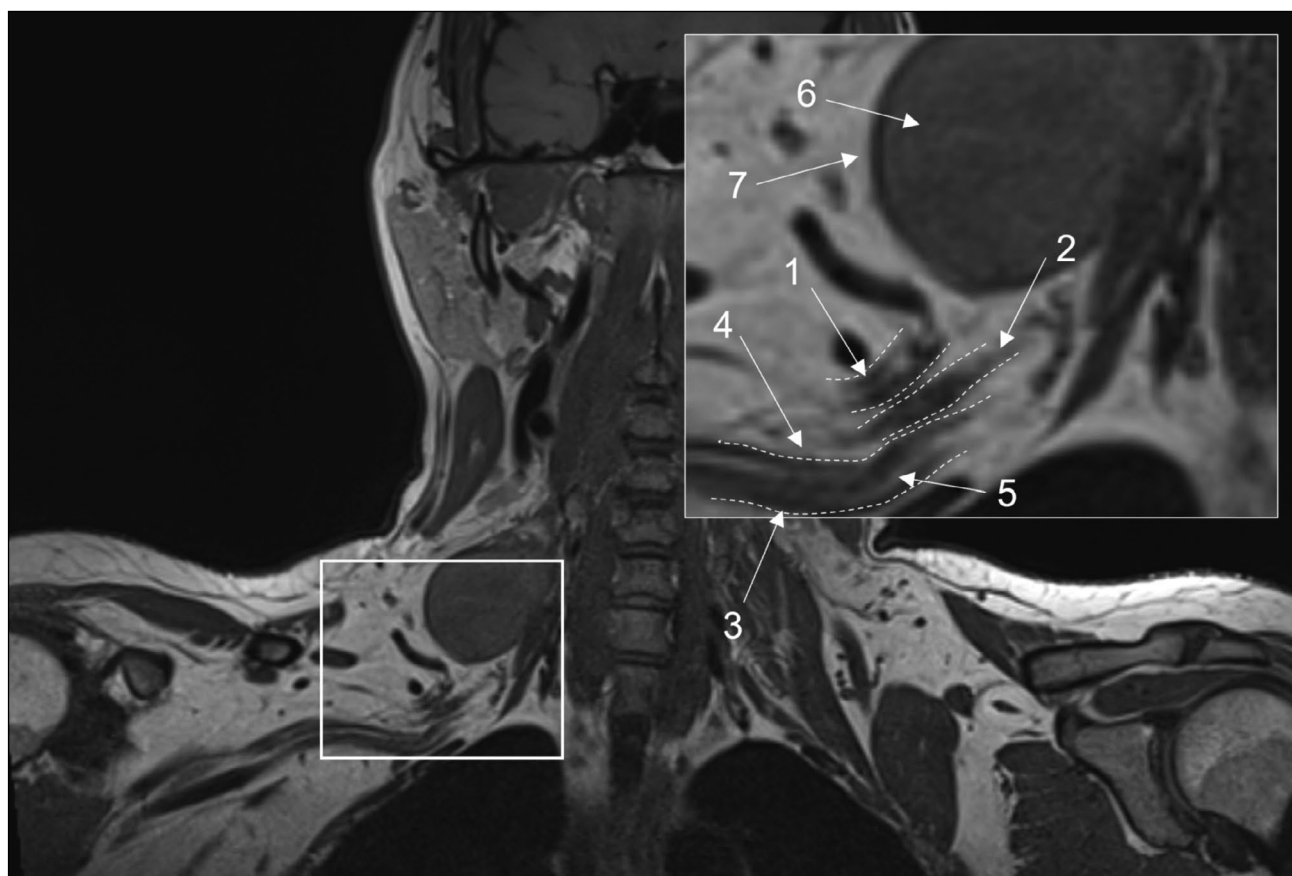


图1。臂丛磁共振成像（3D-T1模式，冠状面）：1——上干；2——中干；3——下干；4——神经周围脂肪组织；5——神经内膜脂肪；6——占位性肿块（神经鞘瘤）；7——肿块周围的完整脂肪组织。

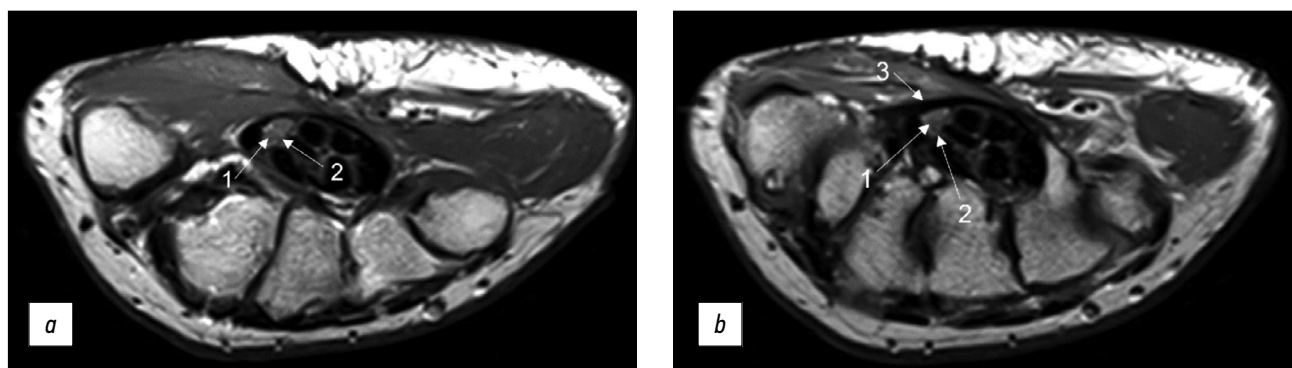


图2。一名腕管综合征患者手部的T2模式磁共振成像，轴状面：*a*——掌骨近端骨髓水平；*b*——头状骨远端水平（1——正中神经内的独立神经束，2——神经外膜，3——增厚至1.29mm的屈肌支持带）。

短的所有组织的信号）。STIR不能在静脉注射对比剂后使用，因为该序列总结了T2和T1对比，只能提供类似于T2加权图像的图像。STIR通常容易出现搏动造成的伪影、神经内液体造成的信号增强导致的神经假性信号增强，而且信噪比较低。因此，在某些情况下，如果频率选择性脂肪抑制因某种原因无效，或由于视野中存在金属，则更多地使用该序列进行神经丛成像。同时，对该序列进行各种修改，例如，更短的回波时间（30–40ms）、更多的回波时间数量和更宽的带宽（400–500 Hz/Px）。

MRN的最佳序列是FatSat和STIR技术的结合，即带有频谱绝热反转脉冲的T2加权反转恢复序列。该脉冲调整为脂肪前冲频率。这种序列被称为T2-SPAIR（SPectral Attenuated Inversion Recovery）。T2-SPAIR序列可提供与STIR序列相媲美的同质性，但在视野中心和外围的脂肪抑制效果更佳，信噪比更高，搏动伪影更小。通常情况下，T2-SPAIR图像上正常神经的信号与骨骼肌的信号等密度。根据用户的偏好，可以使用弱对比度和强对比度。在这种情况下，弱对比度能使神经信号更加均匀，而强对比度则能使神经信

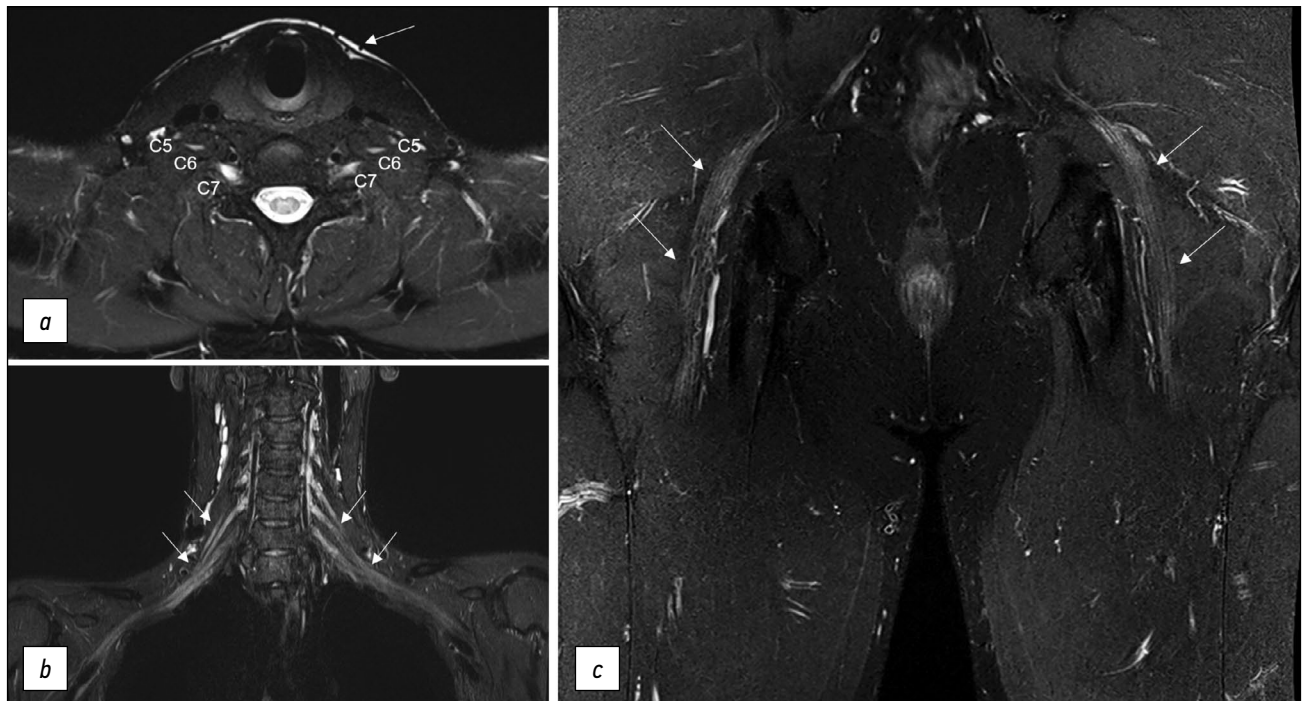


图3.磁共振断层图像上不同的脂肪抑制方法：**a**——T2-FatSat模式下的臂丛，轴状面：脊神经C5、C6、C7的前支明显，无病变，信号略有升高，脂肪抑制不均匀，感兴趣区外围信号不理想（箭头）；**b**——STIR模式下的臂丛，冠状面：整个宽视野中脂肪抑制均匀，正常的臂丛神经有略有升高的信号（箭头）；**c**——T2-Dixon模式下的坐骨神经，冠状面：该技术提供均匀的脂肪抑制，正常的坐骨神经有略有升高的磁共振信号（箭头）。

号更加等密度。这种序列的主要缺点是对几个边缘切片（尤其是扫描区域的边界）的脂肪抑制可能较差，而且无法在低磁场设备和磁场明显不均匀的情况下使用。不过，虽然与频率选择性脂肪抑制序列相比，T2-SPAIR对金属伪影的灵敏度较低，但是，如果扫描区域存在金属，建议使用STIR序列。

使用Dixon技术可以达到最佳的脂肪抑制效果。不过图像也会在偏离中心扫描区域中有问题[25]。该技术由Thomas Dixon于1984年提出[34]。它基于脂肪和水质子共振频率的差异（化学位移效应）。成像时使用两个回波时间的序列。第一次，水和脂肪信号同相；第二次，它们反相。Dixon显示了，通过数学计算，可以从这些图像中生成纯水信号（dixonW）和纯脂肪信号（dixonF）的附加图像。在纯水信号（dixonW）图像中，脂肪信号被抑制。这些图像被广泛应用于临床实践，它们提供均匀的脂肪抑制，唯一明显的伪影是水和脂肪信号的局部变化（fat-water swap），它与磁场的非均匀性有关，通常位于线圈覆盖区域的边界[35]。不过，由于扫描时间较长，这种方法在神经成像中的应用仅限于二维成像。

一般来说，病理改变的周围神经在T2加权图像上的直径会更大，信号强度会更高。不同的脂肪抑制技术会使信号强度更加明显。神经的结构和大小可是相对于邻近神经和血管束评估的。血管束可以作为内部参考[36]。例如，就坐骨神经而言，其直径与血管直径的比值增大超过0.89时，

可被视为病变[37]。除了来自神经本身的信号外，还应注意来自邻近肌肉的信号：邻近肌肉信号强度的增加是去神经支配变化的直观反映，最早可在神经损伤后第5天出现[38]。

需要注意的是，为了可靠地解读磁共振神经成像数据，有必要了解可能存在的误区。首先，对于大量（约60%）健康志愿者来说，在对液体信号敏感的图像上发现生理性收缩处的局部信号强度增加。因此，除了信号变化这一事实本身外，还有必要对其分布量以及伴随的神经肿胀和增厚进行评估。另一个重要因素是所谓的魔角效应，即在短TE（小于32ms）序列中，相对于磁场B0方向呈55度角的结构磁共振信号强度增加[3]。

T2加权图像上的信号增强是周围神经损伤的一个敏感但非特异性标记。它无法计数，需要根据不同的病变模式进行仔细解读，包括其分布程度和不同物种神经口径的变化。

NS-RADS量表

NS-RADS（基于磁共振成像数据的Neuropathy Score Reporting and Data System）量表的使用指南现已发布[39]。根据作者的观点，NS-RADS可被用于根据病史和检查数据对周围神经病变的类型和严重程度进行更标准化的反映。NS-RADS涵盖的病理类型包括外伤（NS-RADS I1-5）、压迫综合征（NS-RADS E1-3）、肿瘤（NS-RADS N1-4）、弥漫性神经病变（NS-RADS D1-2）和不同严重程度的术后病症（NS-RADS PI1-3）、以及区域肌肉的去

神经支配变化 (NS-RADS M0–3)、评估变化的数据不足 (NS-RADS 0) 和无临床意义的无变化或轻微变化 (NS-RADS U)。此外, 还单独确定 NS-RADS NOS (not otherwise specified) 类别。建议将临床怀疑为神经病变的病例包括在内, 这些病例的病史或检查结果数据不明确。预计使用该分类法可对周围神经的MRI变化进行标准化评估, 提高专家意见的统一性, 并改善跨学科合作, 以优化临床和科研工作。该分类法的详细内容可在原始资料中找到, 但作者认为, 随着该分类法实施范围的扩大, 可能会出现新的类别和部分, 以优化其在临床实践中的应用[40]。

结论

需要注意的是, 磁感应强度为3T的断层扫描仪更适合被用于周围神经成像。金属结构造成的伪影更严重, 但信噪比更高。强调检查协议的最低要求也很有用。建议使用三维序列来显示出神经丛。对于四肢神经的研究, 获得二维图像是可以接受的, 但切片厚度要小 (2.5–3.5mm)。评估数据的高分辨率 (扫描平面上0.2–0.8mm) 是一个重要条件。协议必须包括脂肪抑制、液体敏感成像 (STIR、T2SPAIR、T2FatSat、T2Dixon)、T1和T2加权成像序列。至少有一种模式的切片应与神经长轴垂直。

需要强调的是, 虽然磁共振成像存在诸多困难和局限, 但仍不失为一种研究周围神经系统的

高信息量方法。磁共振成像正越来越多地被引入临床实践。磁共振成像可诊断周围神经的病理变化, 同时对周围结构进行综合评估, 并对某些疾病进行鉴别诊断。利用标准磁共振神经成像技术来提高信息量和扩大磁共振成像检查的实施范围的前景, 首先与描述神经信号大小和特征的人群年龄标准基础的形成有关。详细描述各种病理情况下的神经损伤模式也是有现实意义的问题。

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. S.N. Morozova — search for publications on the topic, manuscript text writing, figures preparation, V.V. Sinkova — search for publications on the topic, figures preparation, D.A. Grishina — scientific consult, manuscript text editing, T.A. Tumilovich — search for publications on the topic, figures preparation, A.O. Chechetkin — scientific consult, manuscript text editing, approval of the final version, M.V. Krotenkova, N.A. Suponeva — the concept of the study, scientific consult, approval of the final version.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hammi C., Yeung B. Neuropathy. [Updated 2022 Oct 15]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023. Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK542220/>. Дата обращения: 15.08.2023.
2. Chen Y., Haacke E.M., Li J. Peripheral nerve magnetic resonance imaging // *F1000Research*. 2019. Vol. 8. P. 1803. doi: 10.12688/f1000research.19695.1
3. Kollmer J., Bendszus M. Magnetic resonance neurography: Improved diagnosis of peripheral neuropathies // *Neurotherapeutics*. 2021. Vol. 18. P. 2368–2383. doi: 10.1007/s13311-021-01166-8
4. Thompson P.D., Thomas P.K. Clinical patterns of peripheral neuropathy // P.J. Dyck, P.K. Thomas, editors. *Peripheral neuropathy*, 4th ed. Philadelphia: Elsevier Saunders, 2005. P. 1137–1161.
5. Пирадов М.А., Супонева Н.А., Гришина Д.А., Павлов Э.В. Электронейромиография: алгоритмы и рекомендации при полинейропатиях. Москва: Горячая линия-Телеком, 2021. 198 с.
6. Li J. Molecular regulators of nerve conduction: Lessons from inherited neuropathies and rodent genetic models // *Exp Neurol*. 2015. Vol. 267. P. 209–218. doi: 10.1016/j.expneurol.2015.03.009
7. Chung T., Prasad K., Lloyd T.E. Peripheral neuropathy: Clinical and electrophysiological considerations // *Neuroimaging Clin N Am*. 2014. Vol. 24, N 1. P. 49–65. doi: 10.1016/j.nic.2013.03.023
8. Dyck P.J., Oviatt K.F., Lambert E.H. Intensive evaluation of referred unclassified neuropathies yields improved diagnosis // *Ann Neurol*. 1981. Vol. 10, N 3. P. 222–226. doi: 10.1002/ana.410100304
9. Stewart J.D. Peripheral nerve fascicles: Anatomy and clinical relevance // *Muscle Nerve*. 2003. Vol. 28, N 5. P. 525–541. doi: 10.1002/mus.10454
10. Мансурова А.В., Чечёткин А.О., Супонева Н.А., и др. Возможности ультразвукового исследования в диагностике и дифференциальной диагностике бокового амиотрофического склероза: обзор литературы // *Нервно-мышечные болезни*. 2022. Т. 12, № 1. С. 21–28. doi: 10.17650/2222872120221212128
11. Gasparotti R., Padua L., Briani C., Lauria G. New technologies for the assessment of neuropathies // *Nat Rev Neurol*. 2017. Vol. 13. P. 203–216. doi: 10.1038/nrneurol.2017.31
12. Deshmukh S., Sun K., Komaraju A., et al. Peripheral nerve imaging: Magnetic resonance and ultrasound correlation // *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 2023. Vol. 31, N 2. P. 181–191. doi: 10.1016/j.mric.2023.01.003
13. Ohana M., Moser T., Moussaoui A., et al. Current and future imaging of the peripheral nervous system // *Diagn Interv Imaging*. 2014. Vol. 95. P. 17–26. doi: 10.1016/j.diii.2013.05.008
14. Muller I., Miguel M., Bong D.A., et al. The peripheral nerves: Update on ultrasound and magnetic resonance imaging // *Clin Exp Rheumatol*. 2018. Vol. 36, Suppl. 114. P. 145–158.
15. Aggarwal A., Chhabra A. Magnetic resonance neurography: Is it so complicated that it needs a touch of genius? // *Eur Radiol*. 2022. Vol. 32, N 6. P. 3912–3914. doi: 10.1007/s00330-021-08525-1

16. Singh T., Kliot M. Imaging of peripheral nerve tumors // *Neurosurg Focus*. 2007. Vol. 22, N 6. P. E6. doi: 10.3171/foc.2007.22.6.7
17. Filler A.G., Howe F.A., Hayes C.E., et al. Magnetic resonance neurography // *Lancet*. 1993. Vol. 341, N 8846. P. 659–661. doi: 10.1016/0140-6736(93)90422-d
18. Howe F.A., Filler A.G., Bell B.A., Griffiths J.R. Magnetic resonance neurography // *Magn Reson Med*. 1992. Vol. 28, N 2. P. 328–338. doi: 10.1002/mrm.1910280215
19. Mazal A.T., Faramarzian A., Jonathan D.S., et al. MR neurography of the brachial plexus in adult and pediatric age groups: Evolution, recent advances, and future directions // *Expert Review of Medical Devices*. 2020. doi: 10.1080/17434440.2020.1719830
20. 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 // *J Peripher Nerv Syst*. 2010. Vol. 15, N 4. P. 295–301. doi: 10.1111/j.1529-8027.2010.00290.x
21. Van den Bergh P.Y., van Doorn P.A., Hadden R.D., 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 // *J Peripher Nerv Syst*. 2021. Vol. 26, N 3. P. 242–268. doi: 10.1111/jns.12455
22. Chhabra A., Madhuranthakam A.J., Andreisek G. Magnetic resonance neurography: Current perspectives and literature review // *Eur Radiol*. 2018. Vol. 28, N 2. P. 698–707. doi: 10.1007/s00330-017-4976-8
23. Szaro P., McGrath A., Cizek B., Geijer M. Magnetic resonance imaging of the brachial plexus. Part 1: Anatomical considerations, magnetic resonance techniques, and non-traumatic lesions // *Eur J Radiol*. 2022. Vol. 20, N 9. P. 100392. doi: 10.1016/j.ejro.2021.100392
24. Holzgrefe R.E., Wagner E.R., Singer A.D., Daly Ch.A. Imaging of the peripheral nerve: Concepts and future direction of magnetic resonance neurography and ultrasound // *Current Concepts*. 2019. Vol. 44, N 12. P. 1066–1079. doi: 10.1016/j.jhsa.2019.06.021
25. Chhabra A., Flammang A., Padua A. Jr., et al. Magnetic resonance neurography: Technical considerations // *Neuroimaging Clin N Am*. 2014. Vol. 24, N 1. P. 67–78. doi: 10.1016/j.nic.2013.03.032
26. Chalian M., Chhabra A. Top-10 tips for getting started with magnetic resonance neurography // *Semin Musculoskelet Radiol*. 2019. Vol. 23, N 4. P. 347–360. doi: 10.1055/s-0039-1677727
27. Sneag D.B., Queler S. Technological advancements in magnetic resonance neurography // *Curr Neurol Neurosci Rep*. 2019. Vol. 19, N 10. P. 75. doi: 10.1007/s11910-019-0996-x
28. Thakkar R.S., Del Grande F., Thawait G.K., et al. Spectrum of high-resolution MRI findings in diabetic neuropathy // *AJR Am J Roentgenol*. 2012. Vol. 199, N 2. P. 407–412. doi: 10.2214/AJR.11.7893
29. Thawait S.K., Chaudhry V., Thawait G.K., et al. High-resolution MR neurography of diffuse peripheral nerve lesions // *AJNR Am J Neuroradiol*. 2011. Vol. 32, N 8. P. 1365–1372. doi: 10.3174/ajnr.A2257
30. McDonald C.M., Carter G.T., Fritz R.C., et al. Magnetic resonance imaging of denervated muscle: Comparison to electromyography // *Muscle Nerve*. 2000. Vol. 23, N 9. P. 1431–1434. doi: 10.1002/1097-4598(200009)23:9<1431::aid-mus16>3.0.co;2-p
31. Stoll G., Bendszus M., Perez J., Pham M. Magnetic resonance imaging of the peripheral nervous system // *J Neurol*. 2009. Vol. 256, N 7. P. 1043–1051. doi: 10.1007/s00415-009-5064-z
32. Chhabra A., Thawait G.K., Soldatos T., et al. High-resolution 3T MR neurography of the brachial plexus and its branches, with emphasis on 3D imaging // *AJNR Am J Neuroradiol*. 2013. Vol. 34, N 3. P. 486–497. doi: 10.3174/ajnr.A3287
33. Bischoff C., Kollmer J., Schulte-Mattler W. State-of-the-art diagnosis of peripheral nerve trauma: Clinical examination, electrodiagnostic, and imaging // K.A. Haaster-Talini, G. Antoniadis, editors. *Modern concepts of peripheral nerve repair*. 1st ed. Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-52319-4_2
34. Dixon W.T. Simple proton spectroscopic imaging // *Radiology*. 1984. Vol. 153. P. 189–194. doi: 10.1148/radiology.153.1.6089263
35. Grimm A., Meyer H., Nickel M.D., et al. Evaluation of 2-point, 3-point, and 6-point Dixon magnetic resonance imaging with flexible echo timing for muscle fat quantification // *Eur J Radiol*. 2018. Vol. 103. P. 57–64. doi: 10.1016/j.ejrad.2018.04.011
36. Subhawong T.K., Wang K.C., Thawait S.K., et al. High-resolution imaging of tunnels by magnetic resonance neurography // *Skeletal Radiol*. 2012. Vol. 41. P. 15–31. doi: 10.1007/s00256-011-1143-1
37. Chhabra A., Chalian M., Soldatos T., et al. 3-T high-resolution MR neurography of sciatic neuropathy // *Am J Roentgenol*. 2012. Vol. 198. P. 357–364. doi: 10.2214/AJR.11.6981
38. Kollmer J., Bendszus M., Pham M. MR neurography: Diagnostic imaging in the PNS // *Clin Neuroradiol*. 2015. Vol. 25, Suppl. 2. P. 283–289. doi: 10.1007/s00062-015-0412-0
39. Chhabra A., Deshmukh S.D., Lutz A.M., et al. Neuropathy score reporting and data system: A reporting guideline for MRI of peripheral neuropathy with a multicenter validation study // *AJR Am J Roentgenol*. 2022. Vol. 219, N 2. P. 279–291. doi: 10.2214/AJR.22.27422
40. Chhabra A., Deshmukh S.D., Lutz A.M., et al. Neuropathy score reporting and data system (NS-RADS): MRI reporting guideline of peripheral neuropathy explained and reviewed // *Skeletal Radiol*. 2022. Vol. 51, N 10. P. 1909–1922. doi: 10.1007/s00256-022-04061-1

REFERENCES

1. Hammi C, Yeung B. Neuropathy. [Updated 2022 Oct 15]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK542220/>.
2. Chen Y, Haacke EM, Li J. Peripheral nerve magnetic resonance imaging. *F1000Research*. 2019;(8):1803. doi: 10.12688/f1000research.19695.1
3. 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
4. Thompson PD, Thomas PK. Clinical patterns of peripheral neuropathy. In: Dyck PJ, Thomas PK, editors. *Peripheral neuropathy*. 4th ed. Elsevier Saunders, Philadelphia: 2005. P. 1137–1161.
5. Piradov MA, Suponeva NA, Grishina DA, Pavlov YeV. Electroneuromyography: Algorithms and recommendations in polyneuropathies. Moscow: Goryachaya liniya-Telecom; 2021. 198 p. (In Russ).

6. Li J. Molecular regulators of nerve conduction: Lessons from inherited neuropathies and rodent genetic models. *Exp Neurol*. 2015;(267):209–218. doi: 10.1016/j.expneurol.2015.03.009
7. Chung T, Prasad K, Lloyd TE. Peripheral neuropathy: Clinical and electrophysiological considerations. *Neuroimaging Clin N Am*. 2014;24(1):49–65. doi: 10.1016/j.nic.2013.03.023
8. Dyck PJ, Oviatt KF, Lambert EH. Intensive evaluation of referred unclassified neuropathies yields improved diagnosis. *Ann Neurol*. 1981;10(3):222–226. doi: 10.1002/ana.410100304
9. Stewart JD. Peripheral nerve fascicles: Anatomy and clinical relevance. *Muscle Nerve*. 2003;28(5):525–541. doi: 10.1002/mus.10454
10. 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. (In Russ). doi: 10.17650/2222-8721-2022-12-1-21-28
11. Gasparotti R, Padua L, Briani C, Lauria G. New technologies for the assessment of neuropathies. *Nat Rev Neurol*. 2017;13(4):203–216. doi: 10.1038/nrneurol.2017.31
12. Deshmukh S, Sun K, Komaraju A, et al. Peripheral nerve imaging: Magnetic resonance and ultrasound correlation. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 2023;31(2):181–191. doi: 10.1016/j.mric.2023.01.003
13. Ohana M, Moser T, Moussaoui A, et al. Current and future imaging of the peripheral nervous system. *Diagn Interv Imaging*. 2014;95(1):17–26. doi: 10.1016/j.diii.2013.05.008
14. Muller I, Miguel M, Bong DA, et al. The peripheral nerves: Update on Ultrasound and magnetic resonance imaging. *Clin Exp Rheumatol*. 2018; 36(Suppl 114):145–58.
15. Aggarwal A, Chhabra A. Magnetic resonance neurography: Is it so complicated that it needs a touch of genius? *Eur Radiol*. 2022;32(6):3912–3914. doi: 10.1007/s00330-021-08525-1
16. Singh T, Klot M. Imaging of peripheral nerve tumors. *Neurosurg Focus*. 2007;22(6):E6. doi: 10.3171/foc.2007.22.6.7
17. Filler AG, Howe FA, Hayes CE, et al. Magnetic resonance neurography. *Lancet*. 1993;341(8846):659–661. doi: 10.1016/0140-6736(93)90422-d
18. Howe FA, Filler AG, Bell BA, Griffiths JR. Magnetic resonance neurography. *Magn Reson Med*. 1992;28(2):328–338. doi: 10.1002/mrm.1910280215
19. Mazal AT, Faramarzalani A, Samet JD, et al. MR neurography of the brachial plexus in adult and pediatric age groups: Evolution, recent advances, and future directions. *Exp Rev Med Devices*. 2020;17(2):111–122. doi: 10.1080/17434440.2020.1719830
20. 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. *J Peripher Nerv Syst*. 2010;15(4):295–301. doi: 10.1111/j.1529-8027.2010.00290.x
21. Van den Bergh PY, van Doorn PA, Hadden RD, 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. *J Peripher Nerv Syst*. 2021;26(3):242–268. doi: 10.1111/jns.12455
22. Chhabra A, Madhuranthakam AJ, Andreisek G. Magnetic resonance neurography: Current perspectives and literature review. *Eur Radiol*. 2018;28(2):698–707. doi: 10.1007/s00330-017-4976-8
23. Szaro P, McGrath A, Cizek B, Geijer M. Magnetic resonance imaging of the brachial plexus. Part 1: Anatomical considerations, magnetic resonance techniques, and non-traumatic lesions. *Eur J Radiol*. 2022;20(9):100392. doi: 10.1016/j.ejro.2021.100392
24. Holzgrefe RE, Wagner ER, Singer AD, Daly ChA. Imaging of the peripheral nerve: Concepts and future direction of magnetic resonance neurography and ultrasound. *Curr Concepts*. 2019;44(12):1066–1079. doi: 10.1016/j.jhsa.2019.06.021
25. Chhabra A, Flammang A, Padua A, et al. Magnetic resonance neurography: Technical considerations. *Neuroimaging Clin N Am*. 2014;24(1):67–78. doi: 10.1016/j.nic.2013.03.032
26. Chalian M, Chhabra A. Top-10 tips for getting started with magnetic resonance neurography. *Semin Musculoskelet Radiol*. 2019;23(4):347–360. doi: 10.1055/s-0039-1677727
27. Sneag DB, Queler S. Technological advancements in magnetic resonance neurography. *Curr Neurol Neurosci Rep*. 2019;19(10):75. doi: 10.1007/s11910-019-0996-x
28. Thakkar RS, Del Grande F, Thawait GK, et al. Spectrum of high-resolution MRI findings in diabetic neuropathy. *AJR Am J Roentgenol*. 2012;199(2):407–412. doi: 10.2214/AJR.11.7893
29. Thawait SK, Chaudhry V, Thawait GK, et al. High-resolution MR neurography of diffuse peripheral nerve lesions. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2011;32(8):1365–1372. doi: 10.3174/ajnr.A2257
30. McDonald CM, Carter GT, Fritz RC, et al. Magnetic resonance imaging of denervated muscle: Comparison to electromyography. *Muscle Nerve*. 2000;23(9):1431–1434. doi: 10.1002/1097-4598(200009)23:9<1431::aid-mus16>3.0.co;2-p
31. Stoll G, Bendszus M, Perez J, Pham M. Magnetic resonance imaging of the peripheral nervous system. *J Neurol*. 2009;256(7):1043–1051. doi: 10.1007/s00415-009-5064-z
32. Chhabra A, Thawait GK, Soldatos T, et al. High-resolution 3T MR neurography of the brachial plexus and its branches, with emphasis on 3D imaging. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2013;34(3):486–497. doi: 10.3174/ajnr.A3287
33. Bischoff C, Kollmer J, Schulte-Mattler W. State-of-the-art diagnosis of peripheral nerve trauma: Clinical examination, electrodiagnostic, and imaging. In: Haaster-Talini KA, Antoniadis G, editors. *Modern concepts of peripheral nerve repair*. 1st ed. Springer International Publishing; 2017. doi: 10.1007/978-3-319-52319-4_2
34. Dixon WT. Simple proton spectroscopic imaging. *Radiology*. 1984;153(1):189–194. doi: 10.1148/radiology.153.1.6089263
35. Grimm A, Meyer H, Nickel MD, et al. Evaluation of 2-point, 3-point, and 6-point Dixon magnetic resonance imaging with flexible echo timing for muscle fat quantification. *Eur J Radiol*. 2018;(103):57–64. doi: 10.1016/j.ejrad.2018.04.011
36. Subhawong TK, Wang KC, Thawait SK, et al. High-resolution imaging of tunnels by magnetic resonance neurography. *Skeletal Radiol*. 2012;41(1):15–31. doi: 10.1007/s00256-011-1143-1
37. Chhabra A, Chalian M, Soldatos T, et al. 3-T high-resolution MR neurography of sciatic neuropathy. *Am J Roentgenol*. 2012;198(4):357–364. doi: 10.2214/AJR.11.6981

38. Kollmer J, Bendszus M, Pham M. MR neurography: Diagnostic imaging in the PNS. *Clin Neuroradiol.* 2015;25(Suppl 2):283–289. doi: 10.1007/s00062-015-0412-0

39. Chhabra A, Deshmukh SD, Lutz AM, et al. Neuropathy score reporting and data system: A reporting guideline for MRI of peripheral neuropathy with a multicenter validation

study. *AJR Am J Roentgenol.* 2022;219(2):279–291. doi: 10.2214/AJR.22.27422

40. Chhabra A, Deshmukh SD, Lutz AM, et al. Neuropathy score reporting and data system (NS-RADS): MRI reporting guideline of peripheral neuropathy explained and reviewed. *Skeletal Radiol.* 2022;51(10):1909–1922. doi: 10.1007/s00256-022-04061-1

AUTHORS' INFO

* **Sofya N. Morozova**, MD, Cand. Sci. (Med.);
address: 80 Volokolamskoe shosse, 125637 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0002-9093-344X;
eLibrary SPIN: 2434-7827;
e-mail: morozova@neurology.ru

Viktoriya V. Sinkova;
ORCID: 0000-0003-2285-2725;
e-mail: 000564321@mail.ru

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

Taisiya A. Tumilovich;
ORCID: 0000-0002-9538-9690;
eLibrary SPIN: 2264-9457;
e-mail: tumilovich.taisiya@bk.ru

Andrey O. Chechetkin, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-8726-8928;
eLibrary SPIN: 9394-6995;
e-mail: andreychechetkin@gmail.com

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

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

ОБ АВТОРАХ

* **Морозова Софья Николаевна**, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 125637, Москва, Волоколамское шоссе, д. 80;
ORCID: 0000-0002-9093-344X;
eLibrary SPIN: 2434-7827;
e-mail: morozova@neurology.ru

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

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

Тумилович Таисия Александровна;
ORCID: 0000-0002-9538-9690;
eLibrary SPIN: 2264-9457;
e-mail: tumilovich.taisiya@bk.ru

Чечеткин Андрей Олегович, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-8726-8928;
eLibrary SPIN: 9394-6995;
e-mail: andreychechetkin@gmail.com

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

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

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку