

© ГОРБУНОВ Н. С., ЩЕРБИНА П. А., КОБЕР К. В., КАСПАРОВ Э. В., ИЗАТУЛИН В. Г.

УДК 611.833.47:617-089.844

DOI: 10.20333/25000136-2022-4-28-38

Современное представление о пучковом строении плечевого сплетения и нервов верхней конечности

Н. С. Горбунов^{1,2}, П. А. Щербина¹, К. В. Кобер¹, Э. В. Каспаров², В. Г. Изатулин³

¹ Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого, Красноярск 660022, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт медицинских проблем Севера, Красноярск 660022, Российская Федерация

³ Иркутский государственный медицинский университет, Иркутск 664003, Российская Федерация

Цель исследования. Обобщить все имеющиеся сведения о пучковом строении плечевого сплетения и нервов верхней конечности. Этот систематический обзор призван обеспечить хорошую основу для фасцикулярного восстановления поврежденных периферических нервов.

Материал и методы. Поиск исследований проводился с использованием электронных баз данных Академия-Google, Medline, PubMed по ключевым словам: пучковое строение плечевого сплетения и нервов верхней конечности, фасцикулярная анатомия, фасцикулярное восстановление поврежденных нервов. Всего было рассмотрено 187 статей и 104 статьи были признаны релевантными согласно критериям включения.

Результаты. В приведенном обзоре подробно отражены пять этапов поиска знаний и общие особенности пучкового строения плечевого сплетения и периферических нервов верхней конечности. Показана роль соединительной ткани в формировании сплетений и стабилизации пучкового строения. Подробно описывается вариантная анатомия пучков дистальных отделов периферических нервов (форма, размеры, количество и топография). Показана роль знаний о пучковом строении в фасцикулярном восстановлении поврежденных периферических нервов верхней конечности.

Заключение. За последние 250 лет пройден сложный путь выявления знаний и формирования представления о пучковом строении плечевого сплетения и периферических нервов верхней конечности. Полученные знания легли в основу многочисленных методов фасцикулярного восстановления поврежденных нервов. Несмотря на достигнутые результаты необходимы дальнейшие исследования по изучению органных особенностей и вариантной анатомии пучкового строения всех нервов верхней конечности на всем протяжении до спинного мозга.

Ключевые слова: плечевое сплетение, пучковое строение, нервы верхней конечности, фасцикулярная анатомия, фасцикулярное восстановление поврежденных нервов.

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

Для цитирования: Горбунов НС, Щербина ПА, Кобер КВ, Каспаров ЭВ, Изатулин ВГ. Современное представление о пучковом строении плечевого сплетения и нервов верхней конечности. *Сибирское медицинское обозрение.* 2022;(4):28-38. DOI: 10.20333/25000136-2022-4-28-38

The modern concept of the bundle structure of the brachial plexus and nerves of the upper limb

N. S. Gorbunov^{1,2}, P. A. Shherbina¹, K. V. Kober¹, Je. V. Kasparov², V. G. Izatulin³

¹ Prof. V. F. Voino-Yasensky Krasnoyarsk State Medical University, Krasnoyarsk 660022, Russian Federation

² Research Institute of Medical Problems of the North, Krasnoyarsk 660022, Russian Federation

³ Irkutsk State Medical University, Irkutsk 664003, Russian Federation

The aim of the research. To summarise all available information about the bundle structure of the brachial plexus and the nerves of the upper limb. This systematic review aims to provide a viable basis for fascicular repair of damaged peripheral nerves.

Material and methods. The search for papers was carried out using Google Scholar, Medline and PubMed electronic databases using the following keywords: "bundle structure of the brachial plexus and nerves of the upper limb", "fascicular anatomy", and "fascicular restoration of damaged nerves". A total of 187 articles were reviewed and 104 articles were deemed relevant according to the inclusion criteria.

Results. This review gives a detailed description of the five stages of search for knowledge and general features of the bundle structure of the brachial plexus and peripheral nerves of the upper limb. The role of connective tissue in formation of plexuses and stabilisation of the bundle structure has been shown. The variant anatomy of the distal peripheral nerve bundles (shape, size, number and topography) has been described in detail. The role of knowledge about the bundle structure in the fascicular restoration of damaged peripheral nerves of the upper limb is shown.

Conclusion. Over the past 250 years, a difficult path has been passed to reveal knowledge and form the idea of the bundle structure of the brachial plexus and peripheral nerves of the upper limb. The knowledge gained has formed the basis for numerous methods of fascicular restoration of damaged nerves. Despite the results achieved, it is required to carry out further research on the organ features and variant anatomy of the bundle structure of all upper limb nerves all the way to the spinal cord.

Key words: brachial plexus, bundle structure, nerves of the upper limb, fascicular anatomy, fascicular restoration of damaged nerves.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest associated with the publication of this article.

Citation: Gorbunov NS, Shherbina PA, Kober KV, Kasparov JeV, Izatulin VG. The modern concept of the bundle structure of the brachial plexus and nerves of the upper limb. *Siberian Medical Review.* 2022;(4):28-38. DOI: 10.20333/25000136-2022-4-28-38

Значительным достижением микрохирургии является периневральный шов [1, 2], а фасцикулярная анатомия и соматотопия имеют большое значение в восстановлении поврежденных нервов [3, 4, 5]. Преимущества фасцикулярного шва заключаются в сопоставлении периневральных трубок и точном вращении проксимальных сенсорных и моторных волокон в дистальные однотипные волокна, лучшей миелинизации, быстром восстановлении функций [6, 7, 8]. Для более точного сопоставления функционально связанных пучков необходимы подробные знания интраневрального строения [9, 10].

Реконструкция периферических нервов продолжает развиваться и расширяться с постоянным улучшением понимания внутренней топографии нервов [11, 12, 13]. Наилучшее восстановление функции возможно тогда и только тогда, когда двигательная и сенсорная части нерва соединены точно и правильно [4, 14].

В настоящее время перспективы полного сенсорного и моторного восстановления рассеченного периферического нерва невелики [15]. У 33 % больных с повреждениями периферических нервов отмечается неполное восстановление нервов и плохие функциональные исходы, включая потерю или частичное восстановление двигательных и сенсорных функций, хроническую боль, атрофию и слабость мышц [16]. Только у 55 % оперированных пациентов с повреждениями надключичной части плечевого сплетения отмечаются положительные результаты. При этом, ни у одного из пациентов не восстанавливается тактильная чувствительность и внутренняя функция кисти при повреждении нервного пути от C8 и Th1 [17]. Только у 3 % пациентов, восстанавливаются нормальные ощущения через 5 лет, в то время как менее 25-50 % пациентов восстанавливают правильную двигательную функцию [18]. Противоречивые результаты восстановления нервов побудили исследовать фасцикулярную анатомию.

Возможно, разработка нового 3D-каркаса нерва на основе идеальной модели пучков волокон будет иметь явное преимущество для эффективного практического применения [19, 20, 21]. Знания особенностей строения и интраневральной топографии важны при выборе донора трансплантата с параллельным и локализованным расположением фасцикул, а сведения о количестве и диаметре пучков являются ценными для понимания взаимодействия нейронных протезов с нервом [22, 23, 24, 25].

В связи с выше изложенным, цель настоящего исследования обобщить все имеющиеся сведения о пучковом строении плечевого сплетения и нервов верхней конечности. Этот систематический обзор призван обеспечить хорошую основу для фасцикулярного восстановления поврежденных периферических нервов.

Поиск исследований, относящихся к особенностям пучкового строения нервов, проводился с использованием электронных баз данных Академия-Google, Medline, PubMed. Для поиска соответствующих статей использовались следующие ключевые слова: пучковое строение плечевого сплетения и нервов верхней конечности, фасцикулярная анатомия, фасцикулярное восстановление поврежденных нервов. Критериями включения

являлись работы, раскрывающие: 1) общее строение плечевого сплетения и периферических нервов, 2) пучковое строение плечевого сплетения и нервов верхней конечности, 3) методы фасцикулярного восстановления поврежденных периферических нервов. Были исключены исследования, которые: 1) комментировали строение периферических нервов шейного, поясничного, крестцового и копчикового сплетений, 2) посвящены черепно-мозговым и висцеральным вегетативным нервам. Всего было рассмотрено 187 статей и 104 статьи были признаны релевантными согласно критериям включения. Эти исследования были обобщены и представлены в обзоре.

Исследование одобрено локальной этической комиссией ФГБОУ ВО КрасГМУ (протокол № 91 от 11.09.2018 г.).

Периферическая нервная система соединяет центральную нервную систему с исполнительными органами, состоит из сплетений, нервов, узлов, клеточных и соединительнотканых элементов, подразделяется на соматический и автономный отделы [26, 27]. Через соматические нервы осуществляется произвольный контроль движений тела с помощью скелетных мышц, а через автономные – непроизвольный контроль сердечной мышцы, гладкой мускулатуры и желез большинства тканей и систем органов [28, 29].

Значительную часть соматического отдела периферической нервной системы составляет 31 пара спинномозговых нервов, которые образуются путем слияния переднего (двигательного) и заднего (чувствительного) корешков. Задние корешки входят в спинной мозг в виде 8-10 корешковых нитей через заднюю латеральную борозду, а передний корешок образует 6-7 корешковых нитей, которые выходят через переднюю латеральную борозду. Наибольшая толщина и плотность корешковых нитей отмечаются в плечевой области (C5–Th1) спинного мозга [30, 31]. После выхода из межпозвоночного отверстия ствол спинномозгового нерва вскоре делится на переднюю и заднюю ветви [32]. Задняя ветвь – это смешанный нерв, который проходит на заднюю поверхность и снабжает кожу и мышцы-разгибатели позвоночного столба и головы [33].

Из вентральных ветвей нервов C5, C6, C7, C8 и Th1 (реже C4 и Th2) формируется плечевое сплетение, состоящее из корешков, стволов, разделений и пучков. Плечевое сплетение, длиной около 15 см состоит из более мелких пучков и 350 000 аксонов [34]. Два верхних корешка C5 и C6 формируют верхний ствол, два нижних C8 и Th1 – нижний, а C7 – средний ствол [35, 36]. Каждый ствол за ключицей делится на переднее и заднее разделение, которые над первым ребром формируют три пучка [37]. Передние разделения верхнего и среднего стволов образуют латеральный пучок (C5, C6 и C7), переднее разделение от нижнего ствола продолжается в медиальный пучок (C8 и Th1), а задние разделения от всех трех стволов формируют задний пучок (C5, C6, C7, C8 и Th1).

От плечевого сплетения отходят нервы в следующей последовательности: от корешков – дорсальные нерв лопатки, длинный грудной и подключичный нервы;

от верхнего ствола – надлопаточный нерв; от латерального пучка – латеральный грудной, мышечно-кожный и срединный нервы; от медиального пучка – медиальный грудной, медиальный кожный нерв плеча, медиальный кожный нерв предплечья, срединный и локтевой нервы; от заднего пучка – верхний и нижний подлопаточные, грудоспинной, подмышечный и лучевой нервы [38].

Нерв это орган, состоящий из пучков нервных волокон, располагающихся в рыхлой соединительной ткани (эпиневрив, периневрив, эндоневрив) и обеспечивает проведение нервных импульсов [39, 40]. Эпиневрив через мезоневрив слабо связан с окружающими структурами и отличается уплотнением поверхностного слоя [41, 42]. Выделяют наружный и внутренний эпиневрив, между которыми располагается слой жировых клеток [43, 44]. Все пучки в нерве окружены замкнутым слоем коллагеновых волокон внутреннего эпиневрива, который покрывает наружную поверхность периневрива каждого пучка или группы пучков. Следовательно, внутренний эпиневрив окружает группы пучков, а периневрив покрывает только отдельные пучки и находится в контакте с эндоневрием, окружающим аксоны. Соединительнотканые волокна внутреннего эпиневрива вплетаясь в периневрив создают впечатление нервных сплетений и называются «псевдоплексами» [45, 46].

Эпиневрив содержит коллагеновые и эластические волокна, большая часть которых проходит в продольном и меньше циркулярном направлениях [47]. На поперечных срезах соединительная ткань занимает от 30 до 75 % площади в зависимости от нерва и уровня. В нервах, состоящих из множества мелких пучков, эпиневрива больше, чем там, где их мало и много. Соединительная ткань эпиневрива лучше выражена в области суставов и в крупных нервах, а менее в мелких.

Основным морфологическим элементом нерва является пучок волокон, а его периневрив – это главный и основной признак для определения самого пучка [39, 42, 48]. Макроскопический рисунок ветвления периферических нервов обычно обеспечивается эпиневривальной соединительной тканью, тогда как удаление эпиневрива раскрывает составные пучки, покрытые периневривальной оболочкой, состоящей из тонкой сети со своеобразным рисунком ветвления [48]. Периневрив является соединительнотканым скелетом нерва, а сам нерв представляет собой сложную систему периневривальных трубочек, по которым волокна «переходят» из одного пучка в другой [44].

Пучок – это группа нервных волокон, имеющих общую периневривальную оболочку независимо от разделения на вторичные, более мелкие пучки. Пучок это самая маленькая клиническая единица нерва, с которой хирурги работают, используя современные клинические методы [49]. Морфологическое значение периферических нервов больше обусловлено их ветвлением на периневривальном уровне, чем на эпиневривальном [48].

Каждый пучок нерва окружен относительно тонкой, но плотной и характерной оболочкой из соединительной ткани, в которой коллагеновые волокна диаметром от 400 до 800 А расположены циркулярно, наклонно и продольно в виде 7-15 концентрических пластинок.

С внешней стороны периневрив плавно сливается с внутренним эпиневрием, а изнутри он представляет собой гладкую поверхность, образованную мембраной, состоящей из уплощенных многоугольных мезотелиальных клеток [50]. На периферии чувствительных нервов периневрив переходит в соединительную ткань специализированных сенсорных структур, а в двигательных заканчивается воронкообразным отверстием, закрывающим моторную концевую пластину.

Эндоневрив – это тонкий слой рыхлой соединительной ткани, образующий мембрану вокруг каждого нервного волокна и соединяющийся с перегородками, которые проходят внутрь из периневрива. Соединительнотканый матрикс эндоневрива представлен мукополисахаридами, коллагеновыми и ретикулиновыми волокнами, фибробластами, макрофагами, тучными клетками, капиллярами и эндоневривальной жидкостью [42]. Коллагеновые волокна эндоневрива диаметром от 200 до 300 А, продольно ориентированы и иногда инвагинируются в шванновские клетки немиелинизированных нервных волокон [51, 52]. Эндоневрив переходит в терминальное ветвление аксона и образует эндоневривальную трубку, в которой нервное волокно (аксон и шванновские клетки с миелином) замкнуто [42].

Количество соединительной ткани зависит от нерва, уровня и возраста [42]. Соединительная ткань в эпиневриве спинномозговых нервов C5-Th1 занимает 29-77 %, а в периневриве – 5-28 % [9]. В стволах плечевого сплетения периневривальная соединительная ткань составляет уже 53-58 %. В нервах плечевого сплетения соединительная ткань продолжает увеличиваться и в эпиневриве подмышечного нерва она составляет 77 %, в периневриве – 13 %, а 10 % приходится на нервные волокна. Соединительная ткань эпиневрива и периневрива в лучевом нерве составляет 78 %, в срединном – 73 % и в локтевом – 86 % [51]. С возрастом количество соединительной ткани в нерве увеличивается. Выраженность соединительной ткани и ее пролиферация во время заживления объясняют легкость, с которой она проникает в область шва и препятствует прорастанию аксонов.

Как показывает анализ литературы, кажущееся на первый взгляд простое строение периферических нервов полностью переворачивает наше сознание при более подробном знакомстве [47]. Связано это с тем, что периферические нервы обладают уникальными адаптационными особенностями строения в ответ на изменяющиеся внешние раздражители [32, 33]. Поэтому совершенно недостаточно сведений о пучковом строении плечевого сплетения и проксимальных отделов нервов [21, 24].

Периферические соматические нервы классифицируются на 3 группы: а) монофасцикулярные, имеющие один большой пучок; б) олигофасцикулярные, имеющие несколько крупных пучков; в) полифасцикулярные, которые содержат много мелких пучков [42]. Знания о пучковом строении периферических нервов прошли долгий и сложный путь эволюционного развития.

Первоначально, с середины 18 века, строение нервов рассматривалось, как сложное переплетение пучков нервных волокон [53, 54]. Позже предложена теория

кабельного строения нерва, согласно которой двигательные и чувствительные волокна нерва сгруппированы в изолированные пучки, имеющие строго определенное место в стволе и иннервирующие известную группу мышц, отдельную мышцу или изолированную область кожи [55]. Несмотря на увеличивающееся или уменьшающееся количество пучков они сохраняют свое положение в квадранте поперечного сечения нерва, а анастомозы между соседними пучками не являются многочисленными [56].

Следующий этап познания характеризуется преобладающим мнением о том, что пучки не имеют определенного положения в нерве, вследствие выраженного внутривольного переплетения [35, 57] и даже в одном месте имеют различное строение, как в отношении количества пучков, так и их величины и топографии [58, 59].

Параллельно, на протяжении длительного периода времени, формировалось другое представление о строении периферических нервов, которое предусматривает чередование в них участков переплетения с участками изолированного и локализованного распределения пучков [59]. Выявлено, что в определенных участках у разных нервов треть ствола может быть разделена на пучки без каких-либо явных двигательных или сенсорных потерь [60]. Описано изолированное расположение пучков в кожных нервах на расстоянии до 24 см [6]. Доказано, что в каждом квадранте нерва двигательные или сенсорные волокна сгруппированы по предпочтению [61]. В проксимальных отделах нервов слияние пучков преобладает над разделением с образованием более крупных пучков из более мелких. В дистальных отделах, наоборот, преобладает разделение крупных пучков на более мелкие, а участки изолированной топографии пучков между соединением и разделением составляют до 21 см.

В унисегментарных двигательных нервах происходит формирование интраневральных сплетений двух типов: проксимальное в результате перегруппировки волокон из переднего и заднего корешков, дистальные – афферентных и эфферентных волокон перед разделением нерва на ветви [6, 62, 63]. В плюрисегментарных нервах происходит формирование более сложных сплетений между разными корешками, нервами, пучками, которые должны произвести окончательное расположение волокон по мере приближения к областям их распространения.

У каждого нерва верхней конечности выявлены уровни, где они имеют наиболее простое и локализованное пучковое строение [39, 64]. Срединный и локтевой нервы имеют сложное пучковое строение в локтевой ямке, а более простое – на плече. Лучевой и мышечно-кожный нервы обладают максимальной сложностью в области верхней трети плеча, а простым строением на уровне средней и нижней трети плеча. Выраженность интраневральных сплетений находится в обратной зависимости от толщины пучков, т.е. чем тоньше пучки, тем больше анастомозов, тем сложнее внутривольное строение.

Произведены разделения пучков ладонных ветвей срединного нерва до проксимальной трети предплечья [65]. Доказано, что, несмотря на изменяющийся плексиформный характер нервов, существуют определенные

местоположения групп пучков [66]. Во время операций успешно идентифицированы фасцикулярные группы в плечевом сплетении и нервах на протяжении нескольких сантиметров [17].

Удалось идентифицировать двигательные пучки в срединном нерве на расстоянии 70 см, а сенсорные 207 мм [49]. В локтевом нерве на кисти двигательные и чувствительные пучки изолированно определяются на расстоянии 81 мм, на предплечье – 107 мм. В ветвях лучевого нерва на предплечье чувствительные и двигательные пучки изолированно располагаются на расстоянии 90 мм. Половина всех чувствительных и двигательных волокон срединного нерва на предплечье группируются в пучки, а редкие дистальные интраневральные перемещения являются защитным механизмом, допускающим перекрестную иннервацию с дублированием проводящих путей [67, 68].

В локтевом нерве на уровне дистальной трети предплечья двигательная фасцикулярная группа составляет 30-35 % от общей площади поперечного сечения, а чувствительные пучки дорсальной кожной ветви располагаются изолированно в проксимальном направлении на расстоянии 90-250 мм [43]. На уровне запястья и в дистальной четверти предплечья в срединном нерве двигательные фасцикулярные группы располагаются изолированно на протяжении 5-70 мм, а сенсорные 150 мм. Убедительно доказано, что в срединном, локтевом, лучевом и грудоспинном нервах отдельные пучки выделяются на значительном расстоянии без травмы проводящих волокон [69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77].

В области лучезапястного сустава сенсорные пучки в срединном нерве сохраняют свою локтевую квадрантную позицию на протяжении 4-6 см, а изолированное лучевое расположение сенсорных и моторных пучков к первому пальцу отмечается только в области лучезапястного сустава [78]. В другой работе показано, что в области лучезапястного сустава изолированное расположение чувствительных и двигательных пучков срединного нерва на расстоянии 30 мм, а локтевого – 90 мм [4]. Выделены в срединном нерве пучки от третьего межпальцевого промежутка на расстоянии 21-24,5 см вверх от лучевого шиловидного отростка [22, 46]. Двигательные волокна срединного нерва формируются в изолированные пучки в проксимальной части предплечья (50 мм ниже надмыщелков) [23].

В настоящее время формируется новое представление о пучковом строении периферических нервов, которое предусматривает, что для каждого нерва характерны не только органические, но и варианты особенности внутривольного строения. В поддержку данного представления о строении нервов свидетельствуют ряд публикаций. Установлено, что при осторожном препарировании пучки срединного нерва в 57-86 % случаев переходят в состав локтевого [35, 79]. Интраневральные сплетения отсутствуют в сенсорных нервах и присутствуют во всех двигательных [62]. Сенсорные волокна в пальцевых нервах довольно плотно сгруппированы по ходу ствола, даже в проксимальном направлении и топография этих пучков внутри нерва постоянна [10]. В грудоспинном и длинном грудном нервах выявлено

изолированное расположение пучков [80]. Установлено, что чувствительные (1-3) и двигательный пучки грудоспинального нерва сохраняют свое изолированное положение на всем протяжении от широчайшей мышцы спины до дистальной трети передних и задних корешков [81].

Несмотря на многочисленные и подробные исследования внутриствольного строения периферических нервов до настоящего времени встречаются противоречивые представления о форме, размерах, количестве и топографии пучков. Установлено, что чем толще нерв, тем больше в нем пучков, а чем крупнее пучок, тем более неправильной формой поперечного среза он обладает [58]. В другой работе доказывают, что толщина нерва не определяет количества пучков [82].

Наиболее крупные пучки выявляются в срединном (30-2150 мкм) и лучевом (35-2250 мкм) нервах, средние – локтевом (45-1500 мкм) и мышечно-кожном (30-1000 мкм), а мелкие (15-600 мкм) – кожных [9, 51]. Диаметр пучков в срединном и локтевом нервах значимо больше на плече (600 ± 300 мкм; 570 ± 390 мкм), чем на предплечье (470 ± 180 мкм; 380 ± 180 мкм) [23]. К периферии диаметр пучков уменьшается, а их количество – увеличивается. Чаще всего крупные пучки располагаются на периферии поперечного среза нерва, а средние и мелкие – в центре [39, 83].

Противоречивые сведения отмечаются и в отношении количества пучков. Срединный нерв состоит из 1-24 пучков, а увеличение их количества отмечается в местах отхождения ветвей [39]. Локтевой нерв состоит из 11-22 пучков, при этом, меньшее количество на плече, а больше – предплечье. Лучевой нерв состоит из 7-15 пучков, больше в верхней трети плеча и меньше в средней. Мышечно-кожный нерв состоит из 4-27 пучков, больше в верхней трети плеча и меньше на предплечье. Кожные нервы состоят из значимо меньшего количества пучков: медиальный кожный нерв плеча – 4-7, а медиальный кожный нерв предплечья – 4-9. Нервы на периферии разветвляются на более мелкие ветви, которые состоят из еще более мелких пучков (12) диаметром до 100 мкм.

В локтевом нерве количество пучков колеблется от 10 до 31, в его ветвях – 1-17, в латеральном пучке плечевого сплетения – 6-26, медиальном – 5-24, заднем – 10-23 [9, 51]. D. Ross et al. (1992) в срединном нерве выделил 20 ± 11 пучков [22]. Подмышечный нерв состоит из 3-8 пучков [84], грудоспинальный – 2-4, длинный грудной – 2-5 [80]. По данным М. А. Затолокиной, Е. С. Мишиной (2015), в срединном нерве 11-13 пучков, локтевом – 6-7, в медиальном кожном нерве предплечья – 5 [83]. Brill N. A., Tyler D. J. (2017) установили, что количество пучков в срединном и локтевом нервах меньше на плече ($14\pm 2,6$; $14,1\pm 2,7$) и выше – предплечье ($18,6\pm 3,3$; $20,7\pm 1,4$), тогда как в лучевом нерве количество пучков на плече с 23 уменьшается до 2 – предплечье [24]. Наибольшее количество пучков (42) обнаружено в срединном нерве в проксимальной области предплечья.

L. M. Mioton et al. (2019) установили, что количество пучков в мышечно-кожном нерве сразу после отхождения колеблется от 4 до 10, локтевом – 4-21, срединном – 7-27, лучевом – 13-43 [85]. Малопучковые нервы состоят из

небольшого количества крупных пучков, характеризуются слабым развитием межпучковых связей, частым расположением аксонов внутри пучков, групповым характером иннервации. Многопучковые нервы характеризуются наличием большого количества пучков значительно меньшего диаметра, сильным развитием межпучковых связей и одиночным характером иннервации.

Более поздний, но также сложный этап изучения внутриствольного строения периферических нервов связан с выявлением особенностей топографии пучков. К. Tamura (1969) установил, что пучок волокон поверхностной ветви расположен в передней трети лучевого нерва на протяжении 40 мм выше места соединения с глубокой ветвью [14]. Пучок волокон ветви, иннервирующей мышцы возвышения большого пальца, расположен в задне-боковой части срединного нерва на всем протяжении средней и нижней третей предплечья. Пучок волокон глубокой ветви расположен в задней части локтевого нерва на протяжении дистальной трети предплечья. Пучок волокон дорсальной кожной ветви четко дифференцируется в задне-медиальном квадранте локтевого нерва на протяжении средней трети предплечья. В 98 % случаев двигательные пучки в локтевом нерве занимают медиально-дорсальную или дорсальную позиции на запястье и могут быть идентифицированы в проксимальном направлении на расстоянии 90 мм [85]. Сенсорная фасцикулярная группа прослеживается на расстоянии 250 мм.

В мышечно-кожном нерве двигательные аксоны в 42,8 % случаев локализуются в верхней четверти поперечного сечения, в 14,3 % – нижней и передней, в 14,3 % – нижней, 14,3 % – передней и в 14,3 % – распределены равномерно [85]. В срединном нерве двигательные аксоны в 57,1 % случаев распределены равномерно, в 28,6 % локализуются преимущественно в передней четверти, а в 14,3 % – задней и нижней. В лучевом нерве двигательные волокна в 28,6 % случаев располагаются в верхней четверти, в 28,6 % – нижней, в 14,3 % – верхней и задней, в 14,3 % – верхней и передней, в 14,3 % – распределены равномерно. В локтевом нерве двигательные волокна в 71,4 % случаев распределены равномерно, в 14,3 % – в передней четверти и в 14,3 % – верхней.

Р. Р. Сидорович с соавт. (2011) подробно изучили особенности пучкового строения плечевого сплетения [86]. Установлено, что в верхних двух третях верхнего ствола латеральная фасцикулярная группа образована волокнами надлопаточного нерва, задняя – подмышечного, латерально-передняя – мышечно-кожного, медиально-задняя – лучевого, медиально-передняя – срединного. В нижней трети верхнего ствола ход фасцикулярных групп изменяется: латеральная группа образована по-прежнему волокнами надлопаточного нерва, задняя – лучевого, центрально-латеральная – мышечно-кожного, центрально-медиальная – подмышечного, передняя – срединного. Переднее разделение верхнего ствола состоит из фасцикулярных групп мышечно-кожного, надлопаточного и срединного нервов, заднее – подкрыльцового и лучевого.

Латерально-переднюю фасцикулярную группу среднего ствола составляют волокна мышечно-кожного

нерва, медиально-переднюю – срединного, заднюю – лучевого. Переднее разделение среднего ствола состоит из фасцикулярных групп мышечно-кожного и срединного нервов, заднее – из лучевого. В верхних двух третях нижнего ствола латерально-переднюю фасцикулярную группу образуют волокна срединного, латерально-заднюю – лучевого, медиальную – локтевого нервов. В нижней трети нижнего ствола медиальную фасцикулярную группу по-прежнему составляют волокна локтевого нерва, латеральную – лучевого, передне-центральную – срединного. Переднее разделение нижнего ствола составляют фасцикулярные группы срединного и локтевого нервов, заднее-лучевого.

В верхней трети латерального пучка латерально-переднюю фасцикулярную группу образуют волокна мышечно-кожного, заднее-медиальную – срединного нервов. В нижних двух третях латерального пучка латеральную группу образуют волокна мышечно-кожного нерва, медиальную – срединного. В верхней трети медиального пучка передне-латеральную фасцикулярную группу образуют волокна срединного нерва, задне-медиальную – локтевого. В нижних двух третях медиального пучка латеральная фасцикулярная состоит из волокон срединного нерва, медиальная – локтевого. В верхней трети заднего ствола переднюю фасцикулярную группу составляют волокна лучевого нерва, заднюю – подмышечный. В нижних двух третях волокна подмышечного нерва формируют передне-латеральную группу, лучевого – задне-медиальную.

S. Sinha et al. (2016) установили, что в спинномозговых нервах возможна фасцикулярная диссекция и выявили локализацию всех фасцикулярных групп [87]. Краниальную часть спинномозгового нерва C5 занимают пучки надлопаточного (вентрально – 20 % площади) и подмышечного (дорсально – 20 %) нервов, а в каудальной части располагаются пучки мышечно-кожного нерва (вентрально – 15 %), латеральный (посередине – 15 %) и задний (дорсально – 30 %) канатики. Большую часть спинномозгового нерва C6 занимают пучки мышечно-кожного (вентрально – 40 %) и лучевого (дорсально – 32 %) нервов, а подмышечный (краниально и дорсально), латеральный грудной (каудально и вентрально) и медиальная ножка срединного (каудально и дорсально) нервы занимают незначительную площадь (12 %, 8 % и 8 %).

В спинномозговом нерве C7 располагаются пучки 4 нервов: лучевого (краниально и дорсально – 25 %), латеральная ножка срединного (вентрально, центрально и каудально – 40 %), локтевого (каудально и дорсально – 25 %) и латерального грудного (каудально и вентрально – 10 %). В спинномозговом нерве C8 всю вентральную половину (50 %) занимают пучки медиальной ножки срединного нерва, в дорсальной половине располагаются пучки заднего канатика (краниально – 30 %), локтевого нерва (15 %), кожных нервов плеча и предплечья (каудально – 5 %). Вентральная треть спинномозгового нерва Th1 состоит из медиального канатика (30 %), а дорсальная часть из пучков заднего канатика (краниально – 20 %), локтевого нерва (30 %) и заднего канатика (каудально – 20 %). Установлено, что на пучки

надлопаточного нерва приходится 4 % площади плечевого сплетения, латеральный пучок – 27,2 %, медиальный – 31 % и задний – 37,8 %.

Знания точного расположения пучков волокон являются анатомической основой идентификации, сопоставления и наложения фасцикулярных швов, переноса нервов, использования ауто- и аллотрансплантатов, направляющих трубок и проводников. Фасцикулярная микрохирургия ускоряет прорастание аксонов и улучшает результаты реконструктивных операций.

Таким образом, проведенный анализ литературы показал, что за последние 250 лет пройден сложный путь выявления знаний и формирования представления о пучковом строении плечевого сплетения и периферических нервов верхней конечности. Многочисленными исследованиями доказано, что спинномозговые нервы на всем протяжении от спинного мозга до рецепторов и исполнительных органов состоят из участков переплетения и участков изолированного и локализованного расположения пучков нервных волокон [6, 39, 49, 62, 59, 63, 78, 85].

Пучки афферентных нервных волокон в заднем корешке перегруппировываются перед разделением в 8-10 корешковых нитей и формируют проксимальное заднее корешковое сплетение. Пучки эфферентных нервных волокон из 6-7 корешковых нитей формируют в переднем корешке проксимальное переднее корешковое сплетение. Перегруппировка пучков афферентных и эфферентных нервных волокон из заднего и переднего корешков формирует в стволе спинномозгового нерва второе проксимальное спинномозговое сплетение.

Формирование плечевого сплетения происходит в результате перегруппировки пучков нервных волокон 5 корешков C5, C6, C7, C8, Th1 (реже C4 и Th2) в 3 ствола, 6 разделений, 3 пучка и далее в 16 периферических нервов. В результате интраневральной перегруппировки пучков афферентных и эфферентных волокон перед разделением нерва на ветви формируются дистальные сплетения. В многоветвистых нервах, таких как срединный, локтевой и лучевой, происходит формирование нескольких дистальных интраневральных сплетений пучков волокон, а в мышечных и кожных нервах отмечается изолированное и локализованное расположение пучков на значительном протяжении и даже через плечевое и проксимальные сплетения [81].

Учитывая, что все спинномозговые нервы являются смешанными [88], а чувствительные аксоны прорастают быстрее и по их ходу с отставанием ориентируются двигательные [89], становится понятным формирование сплетений верхней конечности в эмбриогенезе. Для того чтобы достигнуть конечной цели пучкам чувствительных и двигательных волокон, выходящим из разных борозд спинного мозга, проходящим через нити, корешки, стволы, разделения и пучки, необходимо перегруппироваться с образованием проксимальных сплетений. Перед делением нерва на ветви пучки сенсорных и двигательных волокон, чтобы продвигаться вместе, опять перегруппировываются с образованием дистальных сплетений.

Важную роль в формировании сплетений нервов играет их соединительнотканый остов, в котором различают эпиневррий, периневррий и эндоневррий. Макроскопический рисунок ветвления периферических нервов обеспечивается эпиневральной соединительной тканью [48], тогда как периневррий и эндоневррий представляют собой сложную систему трубочек, по которым нервные волокна (аксон и шванновские клетки с миелином) «переходят» из одного пучка в другой [42, 44].

В литературе недостаточно освещена роль соединительной ткани в формировании интраневральных сплетений, нерешенным является вопрос о соподчиненности неврально-соединительнотканых взаимоотношений. В эксперименте на животных доказано, что вокруг поврежденного нервного ствола образуется тканевая капсула, содержащая множество сократительных клеток (миофибробластов), которые играют важную роль в тракции и сближении проксимального и дистального концов друг к другу [90]. Доказано, что успешная регенерация нерва требует, чтобы аксоны развивались антеградно вдоль эндоневральной трубки, а избыточное разрастание соединительной ткани может отклонять их от оптимального направления [91, 92]. Шванновские клетки пролиферируют, удлиняются и выравнивают эндоневральные трубки, чтобы направлять и поддерживать регенерирующие аксоны [93]. Такие сложные комбинированные действия многих хорошо организованных внеклеточных и клеточных структур направляют аксоны к их целевым местам, а на их рост сильно влияет тканевая механика, связанные и растворимые секреторируемые химические факторы и межклеточные взаимодействия [94, 95, 96].

Соединительнотканые волокна внутреннего эпиневррия вплетающиеся в периневррий создают впечатление нервных сплетений и называются «псевдоплексами» [45, 46]. Возможно, последними можно, в какой-то мере, объяснить противоречивые результаты о количестве сплетений в разные периоды изучения строения периферических нервов. С другой стороны, противоречивые результаты о форме и размерах пучков, локализации и количестве их сплетений, протяженности изолированного расположения и топографии пучков свидетельствуют о широком диапазоне адаптационной изменчивости периферических нервов. Изменчивость строения, очевидно, связана с тем, что значительный объем (25-70 %) в нервах занимают живые клетки (отростки нервных клеток, шванновские клетки с миелиновой оболочкой, фибробласты), которые чутко и быстро реагируют на внешние воздействия [96, 97].

В тоже время для периферических нервов свойственна стабильность строения, заключающаяся в незначительных половых, возрастных, конституциональных и билатеральных особенностях строения. Очевидно, эта стабильность связана с тем, что внеклеточный матрикс нерва, занимающий 60-70 % площади и представленный коллагеновыми, эластическими и ретикулиновыми волокнами, гликозаминогликанами и протеогликанами создают остов, более медленно реагирующий на воздействия и стабилизирующий внутреннюю и внешнюю структуру [96].

Стабильность проявляется и в пучковом строении периферических нервов, что особенно важно для практического применения. Как следует из многочисленных данных, между сплетениями отмечаются участки разной протяженности (длиннее у маловетвистых и короче у многоветвистых нервов) изолированного и локализованного пучкового строения периферических нервов [11, 14, 39, 83, 85], а в единичных работах отмечается возможность выделения пучков постоянной локализации в плечевом сплетении [86], спинномозговых нервах [87], передних и задних корешках [81].

Уровень современной микрохирургии позволяет успешно выполнять операции на пучках нерва [2, 49, 98, 99]. Знания особенностей пучкового строения являются анатомической основой хирургического восстановления поврежденных нервов [11, 12, 13]. Для преодоления разрыва нерва используют прямой фасцикулярный или групповой фасцикулярный швы, перенос нервов, нервные ауто- и аллотрансплантаты, различные трубки и проводники [4, 65, 100]. Проведенные исследования и накопленные значительные знания позволяют хирургам идентифицировать чувствительные и двигательные пучки, точно их позиционировать и сшивать фасцикулярным швом, что способствует лучшей регенерации и быстрому восстановлению нарушенных нейрональных путей [1, 2, 45, 71].

Знания вариантной анатомии пучков локтевого, мышечнокожного и грудоспинного нервов позволяют успешно использовать фасцикулярные переводы для восстановления сгибания в локтевом суставе [69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77]. Разработаны методы использования фасцикулярных групп срединного нерва в качестве альтернативного источника аутогенного трансплантата при восстановлении протяженных дефектов нервов верхней конечности [22, 46, 78].

При имплантации интрафасцикулярных электродов для установления полноценной связи между рукой и искусственным протезом важными являются знания формы, диаметра, количества пучков, места их изолированного и локализованного расположения в нервах верхней конечности [22, 23, 24, 25].

Перспективными являются исследования в области 3D-анатомии пучков для создания нервных трансплантатов [19, 20, 21, 101]. Разработаны и успешно испытаны в клинике трехмерные многоканальные каркасы нервов, имитирующих нативную структуру эндоневррия, периневррия и эпиневррия [102]. Использование 3D-визуализации и методов 3D-печати позволяет изготавливать направляющие каналы со сложными анатомическими структурами, внутренней биофункционализацией и с нейротрофическими факторами, создавать сенсорные и моторные пути нерва [103, 104].

Несмотря на указанные в этом обзоре научной литературы достижения считаем, что для улучшения клинических результатов необходимы дальнейшие исследования в области фасцикулярной анатомии.

Заключение

1. На верхней конечности отмечаются проксимальные (корешковые, спинномозговые, плечевое) и дистальные сплетения, между которыми выявляется

изолированное и локализованное расположение пучков нервных волокон. Если органные особенности пучкового строения дистальных отделов периферических нервов изучены довольно подробно, то необходимы дальнейшие исследования в их проксимальных отделах, на протяжении всего плечевого сплетения до спинного мозга.

2. Большинство исследований посвящено строению только трех нервов верхней конечности – срединного, локтевого и лучевого. Необходимы дальнейшие исследования органной специфичности пучкового строения остальных 13 нервов верхней конечности.

3. Подробно изучены варианты строения нервов верхней конечности в отношении формы, размеров, количества пучков и сплетений. Необходимы дальнейшие исследования вариантов топографии пучков на всем протяжении до спинного мозга.

4. Чрезвычайно востребованы знания 3Д анатомии пучков нервных волокон плечевого сплетения и периферических нервов верхней конечности.

Решение данных вопросов позволит на новый уровень поднять диагностику и результаты восстановления поврежденных нервов.

Литература / References

1. Mafi P, Hindocha S, Dhital M, Saleh M. Advances of peripheral nerve repair techniques to improve hand function: a systematic review of literature. *The Open Orthopaedics Journal*. 2012;(6):60-68. DOI: 10.2174/1874325001206010060
2. Beris A, Gkiatas I, Gelalis I, Papadopoulos D, Kostas-Agnantis, I. Current concepts in peripheral nerve surgery. *European Journal of Orthopaedic Surgery and Traumatology*. 2019;(29):263–269. DOI:10.1007/s00590-018-2344-2
3. Deutinger M, Girsch W, Burggasser G, Windisch A, Joshi D, Mayr N, Freilinger G. Peripheral nerve repair in the hand with and without motor sensory differentiation. *Journal Hand Surgery* 1993;18(3):426–432. DOI:10.1016/0363-5023(93)90085-H
4. Kato H, Minami A, Kobayashi M, Takahara M, Ogino T. Functional results of low median and ulnar nerve repair with intraneural fascicular dissection and electrical fascicular orientation. *Journal Hand Surgery* 1998;23(3):471–482. DOI:10.1016/S0363-5023(05)80465-4
5. Stewart JD. Peripheral nerve fascicles: anatomy and clinical relevance. *Muscle and Nerve* 2003;28 (5):525-541. DOI: 10.1002/mus.10454
6. Langley JN, Hashimoto M. On the suture of separate nerve bundles in a nerve trunk and on internal nerve plexuses. *The Journal of Physiology* 1917;51(4-5):318–346. DOI: 10.1113/jphysiol.1917.sp001805
7. Orgel MG, Terzis J, Kepineurial VS. Perineurial repair. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 1977;60(1):80–91. DOI:10.1097/00006534-197707000-00012
8. Jabaley ME. Current concepts of nerve repair. *Clinics in Plastic Surgery*. 1981;8(1):33–44. DOI:10.1016/S0094-1298(20)30471-5
9. Bonnel F. Microscopic anatomy of the adult human brachial plexus: an anatomical and histological basis for microsurgery. *Microsurgery*. 1984;(5):107-117. DOI:10.1002/micr.1920050302

10. Brushart TME. Central course of digital axons within the median nerve of *Macaca mulatta*. *The Journal of Comparative Neurology* 1991;311(2):197–209. DOI:10.1002/cne.903110203
11. Chow JA, Van Beek AL, Meyer DL, Johnson MC. Surgical significance of the motor fascicular group of the ulnar nerve in the forearm. *Journal Hand Surgery* 1985;10(6):867–872. DOI:10.1016/s0363-5023(85)80164-7
12. Boyd KU, Nimigan AS, Mackinnon SE. Nerve reconstruction in the hand and upper extremity. *Clinics in Plastic Surgery*. 2011;38(4):643-660. DOI:10.1016/j.cps.2011.07.008.
13. Горбунов НС, Кобер КВ, Каспаров ЭВ. Анатомические аспекты использования грудоспинного нерва в качестве донора при повреждении мышечно-кожного нерва. *Kazan Medical Journal*. 2020;101(6):820-824. [Gorbunov NS, Kober KV, Kasparov JeV. Anatomical aspects of the use of the thoracic nerve as a donor for musculocutaneous nerve injury. *Kazan Medical Journal*. 2020;101(6):820-824. (In Russian)] DOI: 10.17816/KMJ2020-820
14. Tamura K. The funicular pattern of Japanese peripheral nerves. *Nihon Geka Hokan*. 1969;38(1):35-58.
15. Houshyar Sh, Bhattacharyya A, Shanks R. Peripheral Nerve Conduit: Materials and Structures. *ACS Chemical Neuroscience*. 2019;10(8):3349–3365. DOI:10.1021/acscemneuro.9b00203
16. Wang ML, Rivlin M, Graham JG, Beredjikian PK. Peripheral nerve injury, scarring, and recovery. *Connective Tissue Research*. 2019;60(1):3–9. DOI:10.1080/03008207.2018.1489381
17. Narakas A. Surgical treatment of traction injuries of the brachial plexus. *Clinical, Orthopaedics and Related Research*. 1978;(133):71-90.
18. Raza C, Riaz HA, Anjum R, Shakeel N. Repair strategies for injured peripheral nerve: Review. *Life Sciences*. 2020;(243):117308. DOI:10.1016/j.lfs.2020.117308
19. Yan L, Liu Sh, Qi J, Zhang Zh, Zhong J, Li Q, Liu X, Zhu Q, Yao Zh, Lu Y, Gu L. Three dimensional reconstruction of internal fascicles and microvascular structures of human peripheral nerves. *First Published*. 2019. DOI:10.1002/cnm.3245
20. Liu Sh, Guo Y, Yan L, Lu Y. Three-dimensional reconstruction of internal fascicles of human peripheral nerve. *Medical Imaging*. 2019;(10951). DOI:10.1117/12.2512380
21. Ravagli E, Mastitskaya S, Thompson N, Iacoviello F, Shearing PR, Perkins J, Gourine AV, Aristovich K, Holder D. Imaging fascicular organization of peripheral nerves with fast neural Electrical Impedance Tomography (EIT). *Nature Communications*. 2020. DOI:10.1101/2020.06.04.133843
22. Ross D, Mackinnon SE, Chang YL. Intraneural anatomy of the median nerve provides “third web space” donor nerve graft. *Journal of Reconstructive Microsurgery*. 1992;8(3):225-232. DOI:10.1055/s-2007-1006704
23. Delgado-Martínez I, Badia J, Pascual-Font A, Rodríguez-Baeza A, Navarro X. Fascicular Topography of the Human Median Nerve for Neuroprosthetic Surgery. *Frontiers in Neuroscience*. 2016;(10) DOI:10.3389/fnins.2016.00286
24. Brill NA, Tyler DJ. Quantification of human upper extremity nerves and fascicular anatomy. *Muscle and Nerve*. 2017;56(3):463–471. DOI:10.1002/mus.25534
25. Soubeyrand M, Melhem R, Protais M, Artuso, Crézé M. Anatomy of the median nerve and its clinical applications. *Hand Surgery and Rehabilitation*. 2020;39(1):2-18. DOI:10.1016/j.hansur.2019.10.197

26. Goldstein B. Anatomy of the peripheral nervous system. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*. 2001;12(2):207-236. DOI: 10.1016/s1047-9651(18)30066-4
27. Колесников ЛЛ. Международная анатомическая терминология. М.: Медицина; 2003. 424 с. [Kolesnikov LL. International Anatomical Terminology. M.: Medicina; 2003. 424 p. (In Russian)]
28. McCorry LK. Physiology of the Autonomic Nervous System. *American Journal of Pharmaceutical Education*. 2007;71(4):1-11. DOI:10.5688/aj710478
29. Akinrodey MA, Lui F. Neuroanatomy, Somatic Nervous System. *Last Update: 2020. Accessed December 21, 2021.* <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK556027/>
30. Сидорович РР, Юдинна ОА. Анатомо-топографические особенности плечевого сплетения в аспекте хирургического лечения его травматического повреждения. *Белорусский медицинский журнал*. 2005;2(12):74-78. [Sidorovich RR, Judinna OA. Anatomical and topographic features of the brachial plexus in the aspect of surgical treatment of its traumatic injury. *Belarusian Medical Journal*. 2005;2(12):74-78. (In Russian)]
31. Leijnse JN, D'Herde K. Revisiting the segmental organization of the human spinal cord. *Journal of Anatomy*. 2016;229(3):384-393. DOI:10.1111/joa.12493
32. Deer TR, Pope JE, Lamer TJ, Provenzano D. *Deer's Treatment of Pain*. Springer Cham; 2019. 854 p. DOI:10.1007/978-3-030-12281-2
33. Kaiser JT, Lugo-Pico JG. Neuroanatomy, Spinal Nerves. StatPearls Publishing. *Last Update: 2020. Accessed December 21, 2021.* <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK542218/>
34. Gesslbauer B, Hruby LA, Roche AD, Farina D, Blumer R, Oskar C, Aszmann O.C. Axonal components of nerves innervating the human arm. *Annals of Neurology*. 2017;82(3):396-408. DOI:10.1002/ana.25018
35. Linell E. The distribution of nerves in the upper limb, with reference to variabilities and their clinical significance. *Journal of Anatomy London*. 1921;(55):79-112.
36. Golarz SR, White JM. Anatomic Variation of the Phrenic Nerve and Brachial Plexus Encountered during 100 Supraclavicular Decompressions for Neurogenic Thoracic Outlet Syndrome with Associated Postoperative Neurologic Complications. *Annals of Vascular Surgery*. 2020;(62):70-75. DOI:10.1016/j.avsg.2019.04.010
37. Orebaugh SL, Williams BA. Brachial Plexus Anatomy: Normal and Variant. *The Scientific World Journal*. 2009;(9):300-312. DOI 10.1100/tsw.2009.39
38. Waxenbaum JA, Reddy V, Bordoni B. Anatomy, head and neck, cervical nerves. StatPearls Publishing. *Last Update: 2020. Accessed December 21, 2021.* <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538136/>
39. Максименков АН, Беляев ВИ, Виноградова ВГ, Зайцев ЕИ, Золотарева ТВ, Михайлов АГ, Михайлов СС. Внутривольное строение периферических нервов. *Ленинград: Государственное издательство медицинской литературы*; 1963 375 с. [Maksimenzov AN, Beljaev VI, Vinogradova VG, Zajcev EI, Zolotareva TV, Mihajlov AG, Mihajlov SS. Intrabarrel structure of peripheral nerves. *Leningrad: Gosudarstvennoe izdatel'stvo medicinskoj literatury*; 1963. 375 p. (In Russian)]
40. Catala M, Kubis N. Gross anatomy and development of the peripheral nervous system. *Handbook of Clinical Neurology*. 2013;(115):29-41. DOI:10.1016/B978-0-444-52902-2.00003-5
41. Sunderland S. The connective tissues of peripheral nerves. *Brain*. 1965;88(4):841-854. DOI:10.1093/brain/88.4.841
42. Matejčík V, Haviarová Z, Kuruc R, Šteňo A, Šteňo J. The Composition and Structure of Peripheral Nerves. In: *Intraspinal Variations of Nerve Roots*. Springer, Cham; 2019;3-13 DOI:10.1007/978-3-030-01686-9_1
43. Chow JA, Beek ALV, Bilos ZJ, Meyer DL, Johnson MC. Anatomical basis for repair of ulnar and median nerves in the distal part of the forearm by group fascicular suture and nerve-grafting. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1986;68(2):273-80.
44. Reina MA, Boezaart AP, Tubbs RS, Zaslavich Y, Domínguez MF, Fernández P, Sala Blanch, X. Another (Internal) Epineurium: Beyond the Anatomical Barriers of Nerves. *Clinical Anatomy*. 2019;1-8. DOI:10.1002/ca.23442
45. Williams HB, Jabaley ME. The importance of internal anatomy of the peripheral nerves to nerve repair in the forearm and hand. *Hand Clinics*. 1986;2(4):689-707.
46. Franco MJ, Nguyen DC, Phillips BZ, Mackinnon SE. Intraneural median nerve anatomy and implications for treating mixed median nerve injury in the hand. *Hand (NY)*. 2016;11(4):416-420. DOI:10.1177/1558944716643290
47. Scheithauer BW, Woodruff JM, Erlandson RA. Atlas of Tumor Pathology. The normal peripheral nervous system. *Bathesda, Maryland*. 1999;(24):446.
48. Kudoh H, Sakai T. Fascicular analysis at perineurial level of the branching pattern of the human common peroneal nerve. *Anatomical Science International*. 2007;82(4):218-226. DOI:10.1111/j.1447-073X.2007.00184.x
49. Jabaley ME, Wallace WH, Heckler FR. Internal topography of major nerves of the forearm and hand: A current view. *The Journal of Hand Surgery*. 1980;5(1):1-18. DOI:10.1016/S0363-5023(80)80035-9
50. Затолокина МА. Особенности иннервации соединительнотканых оболочек периферических нервов. *Региональный вестник*. 2019;7(32):20-22. [Zatolokina MA. Features of the innervation of the connective tissue sheaths of peripheral nerves. *Regional'nyj Vestnik*. 2019;7(32):20-22. (In Russian)]
51. Bonnel F. Histologic structure of the ulnar nerve in the hand. *Journal of Hand Surgery*. 1985;10(2):264-269. DOI:10.1016/S0363-5023(85)80119-2.
52. Торсунова ЮП, Баландина ИА, Судюков ОА, Некрасова ЛВ. Морфометрические показатели миелиновых и безмиелиновых нервных волокон срединного нерва. *Медицинская наука и образование Урала*. 2010;3(63):71-74. [Torsunova JuP, Balandina IA, Sudjukov OA, Nekrasova LV. Morphometric parameters of myelinated and nonmyelinated nerve fibers of the median nerve. *Medical Science and Education Urals*. 2010;3(63):71-74. (In Russian)]
53. Prochaska G. The structura nerve. *Vindobonae*. 1779;137.
54. Krause M. Contributions to the neurology of the upper extremity. *Leipzig and Heidelberg*. 1865;52.
55. Stoffel A. Contribution to rational nerve surgery. *Munich Medical Weekly*. 1913;(60):175-179.
56. Lehmann W. The peripheral nerve operations in spastic paralysis. *Results of Surgery and Orthopedics*. 1923;577-652. DOI:10.1007/978-3-642-91226-9_10

57. Auerbach S. The surgical indications in diseases of the peripheral nerves. *Berlin*. 1914;205. DOI: 10.1007/978-3-642-91364-8
58. Иосифов ГМ. Топография пучков, образующих нервные стволы плечевого, поясничного и крестцового сплетений. *Архив анатомии, гистологии и эмбриологии*. 1928;7(6):207-211. [Iosifov GM. Topography of the bundles that form the nerve trunks of the brachial, lumbar and sacral plexuses. *Archive of Anatomy, Histology and Embryology*. 1928;7(6):207-211. (In Russian)]
59. Sunderland S. The intraneural topography of the radial, median and ulnar nerves. *Brain*, 1945. 1945;68(4):243-298. DOI:10.1093/brain/68.4.243
60. Sherren J. Some Points in the Surgery of the Peripheral Nerves. *Edinburgh Medical Journal*. 1906;20(4):297-332.
61. McKinley JC. The intraneural plexus of fasciculi and fibres in the sciatic nerve. *Archives of Neurology and Psychiatry Chicago*. 1921;(6)377-399.
62. Kraus WM, Ingham SD. Peripheral nerve topography. *Archives of Neurology & Psychiatry*. 1920;4(3):259-296. DOI:10.1001/archneurpsyc.1920.0218021001500
63. O'Connell JEA. The Intraneural Plexus and its Significance. *Journal Anatomy*. 1936;70(4):468-497.
64. Gunther SF, DiPasquale D, Martin R. The internal anatomy of the median nerve in the region of the elbow. *Journal Hand Surgery*. 1992;17(4):648-656. DOI:10.1016/0363-5023(92)90310-1.
65. Millesi H, Meissl G, Berger A. The interfascicular nerve grafting of the median and ulnar nerve. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 1972;54(4):727-750.
66. Urushidani H. The funicular pattern of the sciatic nerve in Japanese adults. *Nihon Geka Hokan*. 1974;43(4):254-275.
67. Schady W, Ochoa JL, Torebjork HE, Chen LS. Peripheral projections of fascicles in the human median nerve. *Brain*. 1983;106(3):745-760. DOI:10.1093/brain/106.3.745
68. Zanette G, Lauriola MF, Tamburin S. Sunderland's median nerve fascicular anatomy revisited by ultrasound. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*. 2015;87(3):338-339. DOI:10.1136/jnnp-2014-310043
69. Hallin RG. Microneurography in relation to intraneural topography: somatotopic organisation of median nerve fascicles in humans. *Journal Neurology Neurosurgery and Psychiatry*. 1990;53(9):736-744. DOI:10.1136/jnnp.53.9.736
70. Homma T, Sakai T. Ramification pattern of intermetacarpal branches of the deep branch (Ramus profundus) of the ulnar nerve in the human hand. *Acta Anatomy*. 1991;(141)139-44. DOI: 10.1159/000147113
71. Oberlin C, Béal D, Leechavengvongs S, Salon A, Dauge MC, Sarcy JJ. Nerve transfer to biceps muscle using a part of ulnar nerve for C5-C6 avulsion of the brachial plexus: Anatomical study and report of four cases. *Journal of Hand Surgery*. 1994;19(2):232-237. DOI:10.1016/0363-5023(94)90011-6
72. Mackinnon SE, Novak CB, Myckatyn TM, Tung TH. Results of reinnervation of the biceps and brachialis muscles with a double fascicular transfer for elbow flexion. *Journal of Hand Surgery*. 2005;30(5):978-985. DOI:10.1016/j.jhsa.2005.05.014
73. Liverneux PA, Diaz LC, Beaulieu JY, Durand S, Oberlin C. Preliminary results of double nerve transfer to restore elbow flexion in upper type brachial plexus palsies. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2006;117(3):915-919. DOI: 10.1097/01.prs.0000200628.15546.06
74. Bhandari PS, Deb P. Fascicular selection for nerve transfers: The role of the nerve stimulator when restoring elbow flexion in brachial plexus injuries. *Journal of Hand Surgery*. 2011;36(2):2002-2009. DOI:10.1016/j.jhsa.2011.08.017
75. Pet MA, Ray WZ, Yee A, Mackinnon SE. Nerve transfer to the triceps after brachial plexus injury: Report of four cases. *Journal of Hand Surgery*. 2011;36(3):398-405. DOI:10.1016/j.jhsa.2010.11.024
76. Ray WZ, Pet MA, Yee A, Mackinnon SE. Double fascicular nerve transfer to the biceps and brachialis muscles after brachial plexus injury: Clinical outcomes in a series of 29 cases. *Journal of Neurosurgery*. 2011;114(6):1520-1528. DOI:10.3171/2011.1.jns.10810
77. Sneider D, Bulstra LF, Hundepool CA, Treling WJ, Hovius SER, Shin AY. Outcomes of Single versus Double Fascicular Nerve Transfers for Restoration of Elbow Flexion in Patients with Brachial Plexus Injuries. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2019;144(1):155-166. DOI:10.1097/prs.00000000000005720
78. Watchmaker GP, Gumucio CA, Crandall RE, Vannier MA, Weeks PM. Fascicular topography of the median nerve: a computer based study to identify branching patterns. *Journal of Hand Surgery*. 1991;16(1):53-59. DOI:10.1016/S0363-5023(10)80013-9
79. Harris W. The true form of the brachial plexus. *Journal Anatomy and Physiology*. 1904;38(4):399-422.
80. Raksakulkiat R, Leechavengvongs S, Malungpaishrope K, Uerpaiojkit C, Witoonchart K, Chongthammakun S. Restoration of winged scapula in upper arm type brachial plexus injury: anatomic feasibility. *Journal of The Medical Association of Thailand*. 2009;92(6):244-250.
81. Горбунов НС, Кобер КВ, Каспаров ЭВ, Протасюк ЕН. Особенности внутривидового строения грудоспинного нерва в аспекте восстановления афферентной иннервации при реконструкции груди. *Kazan Medical Journal*. 2020;101(4):519-523. [Gorbunov NS, Kober KV, Kasparov JeV. Features of the intra-trunk structure of the thoracic-spinal nerve in terms of restoration of afferent innervation during breast reconstruction. *Kazan Medical Journal*. 2020;101(4):519-523. (In Russian)] DOI: 10.17816/KMJ2020-519
82. Triumfow A. About the internal structure of the median nerve. *Journal for the Whole of Neurology and Psychiatry*. 1930;126(1):520-535. DOI:10.1007/BF02864123
83. Затолокина МА, Мишина ЕС. К вопросу о микроструктурных особенностях периферических нервов плечевого сплетения в области средней трети плеча. *Волгоградский научно-медицинский журнал*. 2015;2(46):27-29. [Zatolokina MA, Mishina ES. On the question of the microstructural features of the peripheral nerves of the brachial plexus in the region of the middle third of the shoulder. *Volgograd Medical-Scientific Journal*. 2015;2(46):27-29. (In Russian)]
84. Aszmann OC, Dellon AL. The internal topography of the axillary nerve: An anatomic and histologic study as it relates to microsurgery. *Journal of Reconstructive Microsurgery*. 1996;12(06):359-363. DOI:10.1055/s-2007-1006498
85. Mioton LM, Dumanian GA, De la Garza M, Ko JH. Histologic Analysis of Sensory and Motor Axons in Branches of the Human Brachial Plexus. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2019;144(6):1359-1368. DOI:10.1097/prs.00000000000006278

86. Сидорович РР, Смянович АФ, Гузов СА, Юдина ОА. Особенности анатомии плечевого сплетения в аспекте выполнения хирургических вмешательств на его структурах. *Вестник ВГМУ*. 2011;10(2):127-133. [Sidorovich RR, Smejanovich AF, Guzov SA, Judina OA. Features of the anatomy of the brachial plexus in the aspect of performing surgical interventions on its structures. *Vestnik VGMU*. 2011;10(2):127-133. (In Russian)]

87. Sinha S, Prasad GL, Lalwani S. A cadaveric micro-anatomical study of the fascicular topography of the brachial plexus. *Journal of Neurosurgery*. 2016;125(2):355-362. DOI:10.3171/2015.6.jns142181

88. Khan YS, Lui F. Neuroanatomy, Spinal Cord. *Last Update: 2020. StatPearls Publishing. Accessed December 21, 2021. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559056/*

89. Brushart T, Kebaisch F, Wolinsky R, Skolasky R, Li Z, Barker N. Sensory axons inhibit motor axon regeneration in vitro. *Experimental Neurology*. 2019;113073. DOI:10.1016/j.expneurol.2019.113073

90. Chamberlain LJ, Yannas IV, Hsu HP, Spector M. Connective tissue response to tubular implants for peripheral nerve regeneration: The role of myofibroblasts. *The Journal of Comparative Neurology*. 2000;417(4):415-430. DOI:10.1002/(SICI)1096-9861(20000221)417:43.O.CO;2-9

91. Atkins S, Smith KG, Loesch AR, Boissonade FM, O'Kane S, Ferguson MWJ, Robinson PP. Scarring impedes regeneration at sites of peripheral nerve repair. *Neuroreport*. 2006;17(12):1245-1249. DOI:10.1097/01.wnr.0000230519.39456.ea

92. Carriel V, Garzon I, Alaminos M, Campos A. Evaluation of myelin sheath and collagen reorganization pattern in a model of peripheral nerve regeneration using an integrated histochemical approach. *Histochemistry and Cell Biology*. 2011;136(6):709-717. DOI:10.1007/s00418-011-0874-3

93. Gordon T. Peripheral Nerve Regeneration and Muscle Reinnervation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(22):8652. DOI:10.3390/ijms21228652

94. Tucker KL, Meyer M, Barde YA. Neurotrophins are required for nerve growth during development. *Nature Neuroscience*. 2001;4(1):29-37. DOI:10.1038/82868

95. Gordon T. The role of neurotrophic factors in nerve regeneration. *Neurosurgical Focus*. 2009;26(2):E3. DOI:10.3171/foc.2009.26.2.e3

96. Rigby MJ, Gomez TM, Puglielli L. Glial Cell-Axonal Growth Cone Interactions in Neurodevelopment and Regeneration. *Frontiers in Neuroscience*. 2020;14. DOI:10.3389/fnins.2020.00203

97. Jessen KR. Glial cells. *The International Journal of Biochemistry and Cell Biology*. 2004;36(10):1861-1867. DOI:10.1016/j.biocel.2004.02.023

98. Khuong HT, Midha R. Advances in Nerve Repair. *Current Neurology and Neuroscience Reports*. 2012;13(1):322. DOI:10.1007/s11910-012-0322-3

99. Moucharafieh RC, Badra MI, Boulos KA, Mansour JI, Daher JC, Wardani HM, Nehme AH. Nerve transfers in the upper extremity: A review. *Injury*. 2020. DOI:10.1016/j.injury.2020.04.015

100. Dodla MC, Alvarado-Velez M, Mukhatyar VJ, Bellamkonda RV. Peripheral Nerve Regeneration. *Principles of Regenerative Medicine*. 2019;1223-1236. DOI:10.1016/b978-0-12-809880-6.00069-2

101. Tovbis D, Agur A, Mogk JPM, Zariffa J. Automatic three-dimensional reconstruction of fascicles in peripheral nerves from histological images. *PLOS One*. 2020;15(5):e0233028. DOI:10.1371/journal.pone.0233028

102. Carvalho CR, Reis RL, Oliveira JM. Fundamentals and Current Strategies for Peripheral Nerve Repair and Regeneration. *Bioinspired Biomaterials*. 2020;173-201. DOI:10.1007/978-981-15-3258-0_12

103. Johnson BN, Lancaster KZ, Zhen G, He J, Gupta MK, Kong YL, Engel EA, Krick KD, Ju A, Meng F, Enquist LW, Jia X, McAlpine MC. 3D printed anatomical nerve regeneration pathways. *Advanced Functional Materials*. 2015;25(39):6205-6217. DOI:10.1002/adfm.201501760

104. Joung D, Lavoie NS, Guo S, Park SH, Parr AM, McAlpine MC. 3D Printed Neural Regeneration Devices. *Advanced Functional Materials*. 2019;1906237. DOI:10.1002/adfm.201906237

Сведения об авторах

Горбунов Николай Станиславович, д.м.н., профессор, Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого; адрес: Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, д. 1; тел.: +7(391)2201410; e-mail: gorbunov_ns@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4809-4491>

Шербина Полина Андреевна, студентка, Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого; адрес: Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, д. 1; тел.: +7(913)1919710; e-mail: sherbna.polina@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2255-5328>

Кобер Кристина Владимировна, ординатор, Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого; адрес: Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, д. 1; тел.: +79233747709; e-mail: k-kober@mai.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5209-182X>

Каспаров Эдуард Вильямович, д.м.н., профессор, директор, главный врач сибирского отделения российской академии наук «Научно-исследовательский институт медицинских проблем Севера»; адрес: Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, д. 3и; e-mail: chegevara-84@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2548-8044>

Изатулин Владимир Григорьевич, д.м.н., профессор кафедры гистологии, эмбриологии, цитологии, Иркутский государственный медицинский университет; адрес: Российская Федерация, 664003, г. Иркутск, ул. Красного Восстания, д. 1; e-mail: iza.vladimir@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4531-1854X>

Author information

Nikolai S. Gorbunov, Dr.Med.Sci., Professor, Prof. V. F. Voyno-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University; Address: 1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, Russian Federation 660022; Phone: +7(391)2201410, email: gorbunov_ns@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4809-4491>

Polina A. Shherbina, student, Prof. V. F. Voyno-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University; Address: 1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, Russian Federation 660022; Phone: +7(913)1919710, e-mail: sherbna.polina@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2255-5328>

Kristina V. Kober, resident physician, Prof. V. F. Voyno-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University; Address: 1, Partizan Zheleznyak Str., Krasnoyarsk, Russian Federation 660022; Phone: +79233747709; e-mail: k-kober@mai.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5209-182X>

Eduard V. Kasparov, Dr.Med.Sci., Professor, Director, Chief Physician of the «Scientific Research Institute of Medical Problems of the North» Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Address: 3i, Partizana Zheleznyaka Str., Krasnoyarsk, Russian Federation 660022; e-mail: rsimpn@scn.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5988-1688>

Vladimir G. Izatulin, Dr.Med.Sci., Professor, Professor of the Department of Histology, Embryology, Cytology, Irkutsk State Medical University; Address: 1, Krasnogo Vosstaniya Str., Irkutsk, Russian Federation 664003; e-mail: iza.vladimir@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4531-1854X>

Дата поступления 08.12.2021

Дата рецензирования 22.12.2021

Принята к печати 30.05.2022

Received 08 December 2021

Revision Received 22 December 2021

Accepted 30 May 2022