

Трехмерные модели плечевого сплетения как основа дополненной реальности и искусственных трансплантатов

Н.С. Горбунов^{1,2}, К.В. Кобер³, Э.В. Каспаров², С.И. Ростовцев¹, Д.Н. Горбунов¹,
Д.Н. Лебедева⁴, Б.Ю. Никишаев¹

¹ Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого Минздрава России

660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1

² НИИ медицинских проблем Севера ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»

660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 3

³ Красноярский краевой клинический онкологический диспансер им. А.И. Крыжановского

660133, г. Красноярск, ул. 1-я Смоленская, 16

⁴ Иркутский государственный медицинский университет Минздрава России

664003, г. Иркутск, ул. Красного Восстания, 1

Резюме

При сложных травмах нервов верхней конечности во время операции в условиях дополненной реальности и при создании искусственных трансплантатов необходимы знания трехмерного строения плечевого сплетения. Целью настоящего исследования является разработка метода изготовления максимально детализированных и точных полых трехмерных моделей плечевого сплетения из фотополимерных смол. **Материал и методы.** С помощью разработанной методики препарированы и выделены все элементы правого плечевого сплетения у 10 трупов мужчин и женщин в возрасте 39–89 лет, выполнено 3D-сканирование, созданы цифровые модели и 3D-печать. Точность реконструкции проверили сравнительными измерениями электронным штангенциркулем диаметров элементов плечевого сплетения в идентичных местах у препаратов и трехмерных моделей. Полученные данные занесены в программу MS Excel 12.0, с помощью программы Statistica for Windows 12.0 проведен анализ сформированной базы данных. **Результаты и их обсуждение.** Разработанная методика 3D-печати позволила воспроизвести максимально точные модели плечевого сплетения со всеми элементами (5 спинномозговых нервов, 3 ствола, 6 разделений, 3 пучка и 15 нервов) в натуральную величину. Сравнительный качественный анализ показал, что созданные полые трехмерные модели обладают высоким структурным соответствием, улучшают восприятие глубины, подчеркивают пространственные взаимоотношения. Количественный анализ не обнаружил значимых различий диаметров элементов плечевого сплетения у исходных препаратов и трехмерных моделей. Разработанный метод и изготовленные на 3D-принтере модели позволяют выявить детализированные особенности строения плечевого сплетения на периневральном уровне. **Заключение.** Создание полного комплекта трехмерных моделей всех вариантов строения плечевого сплетения позволит оперировать в условиях дополненной реальности и повысить эффективность операций. Кроме того, проведенное исследование является основой для последующего изготовления биосовместимых и биоразлагаемых трансплантатов, которые позволят восстанавливать сложные повреждения нервов верхней конечности.

Ключевые слова: плечевое сплетение, трехмерные модели, 3D-печать, искусственный трансплантат, дополненная реальность.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Автор для переписки. Горбунов Н.С., email: gorbunov_ns@mail.ru

Для цитирования. Горбунов Н.С., Кобер К.В., Каспаров Э.В., Ростовцев С.И., Горбунов Д.Н., Лебедева Д.Н., Никишаев Б.Ю. Трехмерные модели плечевого сплетения как основа дополненной реальности и искусственных трансплантатов. *Сиб. науч. мед. ж.* 2025;45(2):80–87. doi: 10.18699/SSMJ20250208

Three-dimensional models of the brachial plexus as the basis of augmented reality and artificial transplants

N.S. Gorbunov^{1,2}, K.V. Kober³, E.V. Kasparov², S.I. Rostovtsev¹, D.N. Gorbunov¹,
D.N. Lebedeva⁴, B.Yu. Nikishaev¹

¹Professor V.F. Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University of Minzdrav of Russia
660022, Krasnoyarsk, Partizana Zheleznyaka st., 1

²Research Institute of Medical Problems of the North of Krasnoyarsk Scientific Center of SB RAS
660022, Krasnoyarsk, Partizana Zheleznyaka st., 3

³Krasnoyarsk Regional Clinical Oncological Dispensary named after A.I. Kryzhanovskiy
660133, Krasnoyarsk, 1st Smolenskaya st., 16

⁴Irkutsk State Medical University of Minzdrav of Russia
664003, Irkutsk, Krasnogo Vosstaniya st., 1

Abstract

In case of complex injuries to the nerves of the upper limb during surgery in augmented reality and when creating artificial transplants, knowledge of the three-dimensional structure of the brachial plexus is necessary. The aim of this study is to develop a method for manufacturing maximally detailed and accurate hollow three-dimensional models of the brachial plexus from photopolymer resins. **Material and methods.** Using the developed technique, all elements of the right brachial plexus were dissected and isolated from 10 corpses of men and women aged 39–89 years, 3D scanning was performed, digital models were created, and 3D printing was performed. The accuracy of the reconstruction was checked by comparative measurements with an electronic vernier caliper of the diameters of the elements of the brachial plexus in identical places in preparations and three-dimensional models. The data obtained were entered into the MS Excel 12.0 program and the analysis of the generated database was carried out using the Statistica for Windows 12.0 0 program. **Results and discussion.** The developed 3D printing technique made it possible to reproduce the most accurate models of the brachial plexus with all elements (5 spinal nerves, 3 trunks, 6 divisions, 3 bundles and 15 nerves) in full size. A comparative qualitative analysis has shown that the created complete three-dimensional models have a high structural correspondence, improve depth perception, and emphasize spatial relationships. Quantitative analysis did not reveal significant differences in the diameters of the brachial plexus elements in the initial preparations and three-dimensional models. The developed method and 3D-printed models make it possible to identify detailed features of the structure of the brachial plexus at the perineural level. **Conclusions.** Creating a complete set of three-dimensional models of all variants of the structure of the brachial plexus will allow you to operate in augmented reality and increase the efficiency of operations. The conducted research is also the basis for the subsequent manufacture of biocompatible and biodegradable transplants that will allow to repair complex nerve damage in the upper limb.

Key words: brachial plexus, three-dimensional models, 3D printing, artificial graft, augmented reality.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest

Correspondence author. Gorbunov N.S., email: gorbunov_ns@mail.ru

Citation. Gorbunov N.S., Kober K.V., Kasparov E.V., Rostovtsev S.I., Gorbunov D.N., Lebedeva D.N., Nikishaev B.Yu. Three-dimensional models of the brachial plexus as the basis of augmented reality and artificial transplants. *Sibirskiy nauchnyy medicinskiy zhurnal = Siberian Scientific Medical Journal*. 2025;45(2):80–87. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20250208

Введение

Ежегодно во всем мире повреждения периферических нервов составляют 15–40 % от всех травм, а заболеваемость – 16,9 случаев на 100 000 населения [1, 2]. Разрывы плечевого сплетения встречаются реже и составляют 0,7 % от всех дорожно-транспортных травм, а заболеваемость – 0,2–1,6 случая на 100 000 населения [3]. Травмы плечевого сплетения чаще (3–5 %) встречаются в

группе с множественными повреждениями, особенно при катании на мотоциклах, снегоходах, лыжах и сноуборде [4]. Хирургические методы лечения травм плечевого сплетения направлены на восстановление целостности и функции отдельных нервов и включают эпиневральный шов, перенос и пересадку [5]. Эпиневральный шов возможен при дефектах нервов менее 0,5–1,0 см, а ушивание с натяжением вызывает ишемию и приводит к плохому результату [6]. Транспозиция

и трансплантация остаются золотым стандартом для восстановления нервов [7, 8]. Однако неправильное расположение и скручивание пучков, разрастание соединительной ткани, потеря функции донорского участка, образование болезненных невром, несоответствие диаметров и структурные различия, нехватка материала усложняют лечение и приводят к повторным операциям [9]. Поэтому только у 3 % пациентов, перенесших процедуру восстановления нерва, нормализуется чувствительность, а у 25 % – двигательная функция [10].

В настоящее время акцент делается на разработку и использование искусственных нервных проводников из биосовместимых и биоразлагаемых материалов [11, 12], которые имеют преимущество перед аутоотрансплантатами с точки зрения их доступности и простоты изготовления, лучшей регенерации аксонов через большие дефекты [13, 14]. Критериями создания нервных кондуитов является соответствие по диаметру и геометрии канала, биосовместимости и разлагаемости, проницаемости и гибкости [15]. Многочисленные существующие технологии изготовления проводников облегчили регенерацию линейных травм нервов, но их применение при повреждении разветвленных нервов является трудной задачей [16, 17]. Установлено, что проксимальная «культя» нерва может образовывать сложную нервную сеть в многоветвевом канале [18]. В Y-образном проводнике количество регенерирующих аксонов проксимального нерва увеличивается на 4 %, которые далее распадаются на два пучка и врастают в оба дистальных нерва [19].

Напечатанные в настоящее время разветвленные трубопроводы воспроизводят нативный матрикс, имитируют биофизические свойства остаточной ткани, вызывают топографические,

химические и биологические сигналы, которые эффективно стимулируют регенерацию нервов [20, 21]. Хотя и предложено много новых моделей, их серьезным недостатком является то, что они не адаптированы под индивидуальные особенности пациентов [22]. Разработанные проводники предусматривают восстановление целостности и функции только одного нерва, что требует выполнения нескольких операций при сложных травмах. Эти методики не позволяют системно восстановить все плечевое сплетение, все периферические нервы верхней конечности за одну операцию.

Целью настоящего исследования является разработка метода изготовления максимально детализированных и точных полых трехмерных моделей плечевого сплетения из фотополимерных смол.

Материал и методы

Протокол исследования одобрен этическим комитетом Красноярского государственного медицинского университета им. профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого (протокол № 127/24 от 25.09.2024).

Дизайн изготовления трехмерных моделей плечевого сплетения включает последовательное выполнение четырех этапов. На первом этапе в отделении экспертизы трупов Красноярского краевого бюро судебно-медицинской экспертизы и на кафедре оперативной хирургии и топографической анатомии Красноярского государственного медицинского университета им. профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого выполнили анатомическое послойное препарирование 10 трупов мужчин и женщин в возрасте 39–89 лет с выделением всех элементов правого плечевого сплетения (рис. 1, а). Продолжительность времени от смер-

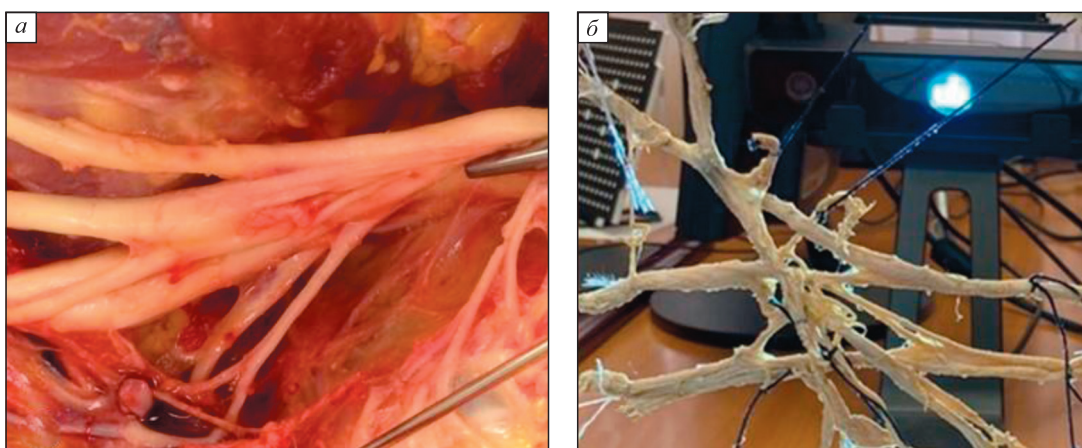


Рис. 1. Препарат правого плечевого сплетения *in situ* (а) и подвешенный на вращающейся платформе сканера (б)
Fig. 1. Preparation of the right brachial plexus *in situ* (a) and suspended on a rotating scanner platform (b)

ти людей до исследования составила до 20 ч, хранение трупов осуществлялось в холодильной камере при температуре 3–5 °С. Причиной смерти у всех людей были общесоматические заболевания без повреждений головы, шеи, верхних конечностей и грудной клетки.

На втором этапе удаленный препарат плечевого сплетения подвешивали в специальной вращающейся платформе (рис. 1, б) и проводили его 3D-сканирование с помощью EinScan-SE (Shining 3D, КНР). Для максимальной детализации плечевого сплетения препарат извлекали из платформы и проводили его повторное препарирование. С помощью налобной бинокулярной лупы при увеличении $\times 2,5$ удаляли эпиневирий и оставляли периневирий. Отпрепарированное плечевое сплетение снова закрепляли в платформе и проводили его повторное 3D-сканирование.

На третьем этапе создавали две цифровые трехмерные модели каждого плечевого сплетения с эпи- и периневрием (рис. 2, а). Построение первичной сетки, уменьшение шумов и подготовку моделей к нарезке в формате SCAN осуществляли в программе EXScan 3.1.3 (Shining 3D). Подготовку моделей к нарезке в формате OBJ выполняли в программе Photon v2.1.24 (Shining 3D), а саму послойную нарезку в формате CTB для дальнейшей печати на 3D-принтере – в программе CHITUBOX Pro (Shining 3D).

Четвертым этапом подготовленную цифровую модель распечатывали на принтере Sonic XL 6K (Phrozen, Тайвань) с разрешением матрицы 5800×4000. Материал печати – белая фотополимерная смола UV Sensitive (Anycubic, КНР). Толщина стенки итоговой трехмерной модели плечевого сплетения 0,125–0,20 мм (рис. 2, б).

В заключение проведено сравнительное измерение электронным штангенциркулем диаметров элементов плечевого сплетения в идентичных местах у препаратов и трехмерных моделей. Все полученные данные внесены в программу MS Excel 12.0 (США), сформированную базу данных проанализировали с помощью программы Statistica for Windows 12.0 (TIBCO Software Inc., США). Нормальность распределения оценивали с помощью критерия Шапиро – Уилка. Данные представлены в виде медианы и квартилей (Me [Q1; Q3]), межгрупповые различия определяли с использованием U-теста Манна – Уитни. Критический уровень значимости нулевой статистической гипотезы (p) принимали равным 0,05.

Результаты

Разработанная методика позволила воспроизвести максимально точные трехмерные модели плечевого сплетения со всеми элементами (5 спинномозговых нервов, 3 ствола, 6 разделений, 3 пучка и 15 нервов) в натуральную величину (рис. 3). Сравнительный качественный анализ показал, что созданные полые трехмерные модели обладают высоким структурным соответствием препаратам плечевого сплетения, улучшают восприятие глубины, подчеркивают пространственные взаимоотношения. Метод также отображает макрорельеф поверхности элементов плечевого сплетения, соответствующий особенностям строения нервных пучков и соединительнотканых оболочек.

Изготовленные на 3D-принтере модели позволяют выявить особенности строения плечевого сплетения на эпи- и перинеуральном уровне.

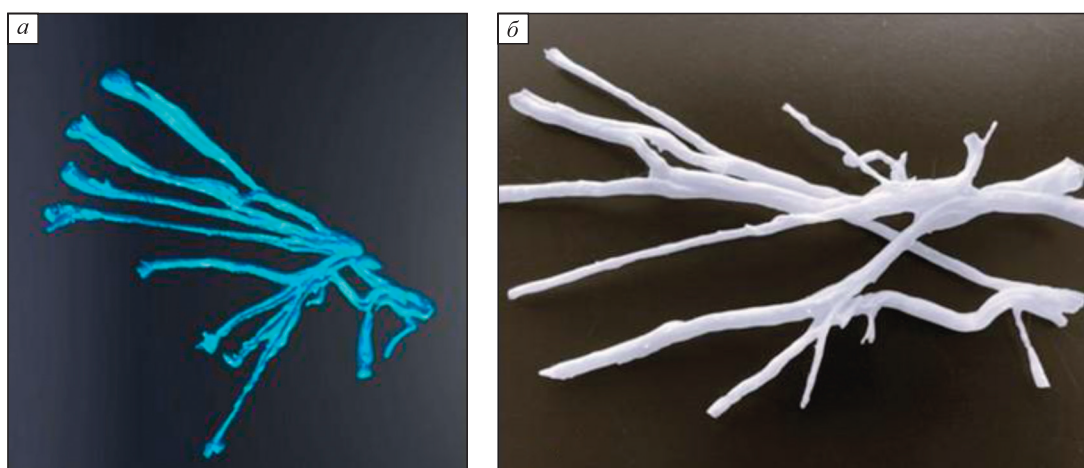


Рис. 2. Цифровая (а) и фотополимерная (б) трехмерные модели правого плечевого сплетения

Fig. 2. Digital (a) and photopolymer (b) three-dimensional models of the right brachial plexus

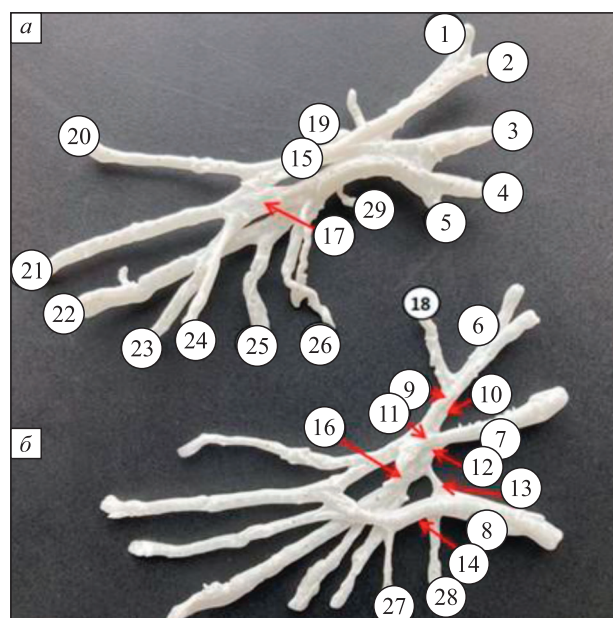


Рис. 3. Фотополлимерные трехмерные полые модели правого плечевого сплетения на эпи- (а) и периневральном (б) уровне. 1 – спинномозговой нерв C_5 , 2 – C_6 , 3 – C_7 , 4 – C_8 , 5 – нервы Th_1 , 6 – верхний, 7 – средний и 8 – нижний стволы, 9 – переднее и 10 – заднее разделение верхнего ствола, 11 – переднее и 12 – заднее разделение среднего ствола, 13 – переднее и 14 – заднее разделение нижнего ствола, 15 – латеральный, 16 – задний и 17 – медиальный пучки, 18 – надлопаточный, 19 – латеральный грудной, 20 – мышечно-кожный, 21 – срединный, 22 – лучевой, 23 – локтевой, 24 – медиальный кожный плеча, 25 – подмышечный, 26 – грудоспинной, 27 – нижний и 28 – верхний подлопаточные и 29 – медиальный грудной нервы

Fig. 3. Photopolymer three-dimensional hollow models of the right brachial plexus at the epi- (a) and perineural (b) levels. 1 – spinal C_5 , 2 – C_6 , 3 – C_7 , 4 – C_8 , 5 – Th_1 nerves, 6 – upper, 7 – middle and 8 – lower trunks, 9 – anterior and 10 – posterior divisions of the upper trunk, 11 – anterior and 12 – posterior divisions of the middle trunk, 13 – anterior and 14 – posterior division of the lower trunk, 15 – lateral, 16 – posterior and 17 – medial bundles, 18 – suprascapular, 19 – lateral thoracic, 20 – musculocutaneous, 21 – median, 22 – radial, 23 – ulnar, 24 – medial cutaneous of the shoulder, 25 – axillary, 26 – thoracodorsal, 27 – inferior and 28 – superior scapular, 29 – medial thoracic nerves

Так, например, эпиневрй создает ложное представление о слиянии среднего и нижнего стволов в один общий, полностью скрывает передние и задние разделения (см. рис. 3). За счет эпиневрия отмечаются различия в границах, диаметре и длине у всех элементов плечевого сплетения. Трехмерные модели также наглядно демонстрируют повышенную детализацию мест бифуркации и слияния, характер ветвления элементов плечевого сплетения на периневральном уровне. Как следует из таблицы, элементы плечевого сплетения значительно не отличаются по диаметру у исходных препаратов и трехмерных моделей, что свидетельствует о высокой точности воспроизведения.

Таким образом, разработанная методика позволила реконструировать точные по размерам, конфигурации и пространственному расположению трехмерные модели плечевого сплетения. Создание банка трехмерных моделей всех вариантов позволит подобрать и во время операции проецировать на тело больного подходящую модель плечевого сплетения, что дополнит реальность выполнения операции, повысит уверенность хирурга, сократит время и улучшит результаты лечения. Изготовленные полые трехмерные модели являются также и основой дальнейшей разработки биосовместимых и биоразлагаемых

трансплантатов плечевого сплетения, заполнение которых факторами роста позволит ускорить регенерацию и одновременно восстанавливать все поврежденные нервы.

Обсуждение

При лечении сложных травм плечевого сплетения актуальной проблемой является знание варианта его строения, которое позволит быстрее и точнее решать вопросы диагностики, выбора индивидуальной тактики лечения при создании искусственных кондуитов. Определение варианта строения плечевого сплетения в настоящее время решается путем прижизненной МРТ-визуализации и создания трехмерной модели.

Применение метода трехмерной многоплоскостной МР-нейрографии позволяет отображать анатомические и патологические изменения в периферических нервах [23]. Использование диффузионно-тензорной томографии дает возможность визуализировать внутреннюю структуру нервов только на незначительном протяжении [24]. Разработана методика 3D-визуализации плечевого сплетения трупа с помощью спиральной компьютерной томографии после субэпинеуральной инъекции контрастом [25]. Современная

Соответствие диаметров элементов плечевого сплетения, мм
Correspondence of the diameters of the elements of the brachial plexus (mm)

Показатель	Препарат	Трехмерная модель	<i>p</i>
Покрытые эпиневрием (<i>n</i> = 10)			
Спинномозговой нерв C ₅	4,95 [4,48; 6,63]	4,88 [4,39; 6,22]	> 0,05
Спинномозговой нерв C ₆	6,22 [5,65; 7,37]	6,24 [5,61; 7,30]	> 0,05
Спинномозговой нерв C ₇	6,54 [5,56; 7,01]	6,23 [5,98; 7,14]	> 0,05
Спинномозговой нерв C ₈	5,95 [5,19; 6,86]	6,76 [5,48; 7,01]	> 0,05
Спинномозговой нерв Th ₁	4,94 [4,23; 5,85]	5,47 [4,32; 6,23]	> 0,05
Верхний ствол	8,38 [7,25; 8,94]	8,33 [7,36; 8,89]	> 0,05
Средний ствол	6,18 [5,43; 7,18]	6,19 [5,82; 7,16]	> 0,05
Нижний ствол	8,40 [7,35; 9,59]	8,61 [7,33; 10,13]	> 0,05
Латеральный пучок	6,23 [5,74; 6,68]	6,3 [5,58; 7,12]	> 0,05
Задний пучок	8,60 [8,44; 9,42]	8,70 [7,29; 9,12]	> 0,05
Медиальный пучок	7,54 [7,14; 8,47]	7,98 [7,07; 8,89]	> 0,05
Покрытые периневрием (<i>n</i> = 10)			
Спинномозговой нерв C ₅	3,93 [3,47; 4,25]	3,82 [3,36; 4,53]	> 0,05
Спинномозговой нерв C ₆	5,17 [4,79; 5,72]	4,96 [4,66; 5,93]	> 0,05
Спинномозговой нерв C ₇	6,05 [5,47; 6,36]	6,09 [5,47; 6,83]	> 0,05
Спинномозговой нерв C ₈	5,13 [4,34; 5,71]	5,23 [4,47; 5,87]	> 0,05
Спинномозговой нерв Th ₁	3,67 [3,20; 4,37]	3,83 [3,66; 4,65]	> 0,05
Верхний ствол	7,18 [6,40; 7,74]	7,19 [5,92; 8,03]	> 0,05
Средний ствол	5,78 [5,22; 6,27]	5,63 [5,05; 6,32]	> 0,05
Нижний ствол	7,57 [6,43; 9,08]	7,53 [6,92; 9,12]	> 0,05
Латеральный пучок	6,00 [5,04; 6,60]	6,24 [5,05; 7,63]	> 0,05
Задний пучок	6,34 [5,56; 7,99]	6,75 [5,82; 7,90]	> 0,05
Медиальный пучок	5,73 [5,02; 6,47]	5,84 [5,18; 6,49]	> 0,05

прижизненная визуализация плечевого сплетения возможна с помощью МРТ-сканирования и 3D-реконструкции полученных снимков в разных специальных программах с кропотливой и длительной процедурой сегментирования [26, 27]. В литературе нами обнаружена только одна работа, в которой авторы осуществили 3D-печать плечевого сплетения одного пациента после МРТ-нейрографии и создания цифровой модели с помощью облачного искусственного интеллекта Axial3D [28]. Результаты применения этих методов показали, что при реконструкции на основе МРТ доминирует внутренняя нервная структура и могут возникать артефакты ветвей. Кроме этого в указанных работах приводится только качественный анализ соответствия и отсутствует количественное подтверждение точности реконструкции.

Нами предлагается второй способ визуализации индивидуального строения плечевого сплетения, который заключается в создании банка всех вариантов цифровых и трехмерных моделей. Проведенное предварительное исследование позволило создать из фотополимерных смол 20

цифровых и трехмерных полых моделей правого плечевого сплетения от 10 трупов людей. Сравнительное качественное и количественное исследование исходных препаратов плечевого сплетения и конечных трехмерных моделей показало точное соответствие всех элементов по размерам, конфигурации и пространственному расположению.

Заключение

Представленный метод позволяет создавать из фотополимерных смол точные трехмерные полые модели плечевого сплетения, которые можно использовать в учебном процессе для детального изучения трехмерной конфигурации. Создание полного комплекта трехмерных моделей всех вариантов строения плечевого сплетения позволит оперировать в условиях дополненной реальности и повысить эффективность операций. Кроме того, проведенное исследование является основой для последующего изготовления биосовместимых и биоразлагаемых трансплантатов, которые позволят восстанавливать сложные повреждения нервов верхней конечности.

Список литературы / References

1. Tapp M., Wenzinger E., Tarabishy S., Ricci J., Herrera F.A. The epidemiology of upper extremity nerve injuries and associated cost in the us emergency departments. *Ann. Plast. Surg.* 2019;83(6):676–680. doi: 10.1097/SAP.0000000000002083
2. Padovano W.M., Dengler J., Patterson M.M., Yee A., Snyder-Warwick A.K., Wood M.D., Moore A.M., Mackinnon S.E. Incidence of nerve injury after extremity trauma in the united states. *HAND (NY)*. 2022;17(4):615–623. doi: 10.1177/1558944720963895
3. Breyer J.M., Vergara P., Perez A. Epidemiology of adult traumatic brachial plexus injuries. In: *Operative Brachial Plexus Surgery: Clinical Evaluation and Management Strategies*. Eds. A.Y. Shin, N. Pulos. Springer International Publishing, 2021. P. 63–68. doi: 10.1007/978-3-030-69517-0_28
4. Kaiser R., Waldauf P., Ullas G., Krajcova A. Epidemiology, etiology and types of severe adult brachial plexus injuries requiring surgical repair: systematic review and meta-analysis. *Neurosurg. Rev.* 2020;43(2):443–452. doi: 10.1007/s10143-018-1009-2
5. Lunga H., O'Connor M., Rocher A.G.L., Marais L.C. Outcomes of surgically managed adult traumatic brachial plexus injuries in an upper-middle-income country. *J. Orthop.* 2024;51:66–72. doi: 10.1016/j.jor.2024.01.006
6. Singh V.K., Haq A., Tiwari M., Saxena A.K. Approach to management of nerve gaps in peripheral nerve injuries. *Injury*. 2022;53(4):1308–1318. doi: 10.1016/j.injury.2022.01.031
7. Gong H., Fei H., Xu Q., Gou M., Chen H.H. 3D-engineered GelMA conduit filled with ECM promotes regeneration of peripheral nerve. *J. Biomed. Mater. Res. A*. 2020;108(3):805–813. doi: 10.1002/jbm.a.36859
8. Zimmermann K.S., Aman M., Harhaus L., Boecker A.H. Improving outcomes in traumatic peripheral nerve injuries to the upper extremity. *Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol.* 2023;34(7):3687–3697. doi: 10.1007/s00590-023-03751-3
9. Duraku L.S., Hundepool C.A., Moore A.M., Eberlin K.R., Zuidam J.M., George S., Power D.M. Sensory nerve transfers in the upper limb after peripheral nerve injury: a scoping review. *J. Hand. Surg. Eur. Vol.* 2024;49(8):946–955. doi: 10.1177/17531934231205546
10. Houshyar S., Bhattacharyya A., Shanks R. Peripheral nerve conduit: materials and structures. *ACS Chem. Neurosci.* 2019;10(8):3349–3365. doi: 10.1021/acscchemneuro.9b00203
11. Song S., Wang X., Wang T., Yu Q., Hou Z., Zhu Z., Li R. Additive manufacturing of nerve guidance conduits for regeneration of injured peripheral nerves. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2020;8:590596. doi: 10.3389/fbioe.2020.590596
12. Zhang Ch., Gong J., Zhang J., Zhu Z., Qian Y., Lu K., Siyi Zhou S., Gu T., Wang H., He Y., Yu M. Three potential elements of developing nerve guidance conduit for peripheral nerve regeneration. *Adv. Funct. Mater.* 2023;33(40):2302251. doi: 10.1002/adfm.202302251
13. Vijayavenkataraman S. Nerve guide conduits for peripheral nerve injury repair: A review on design, materials and fabrication methods. *Acta Biomater.* 2020;106:54–69. doi: 10.1016/j.actbio.2020.02.003
14. Liu K., Yan L., Li R., Song Z., Ding J., Liu B., Chen X. 3D printed personalized nerve guide conduits for precision repair of peripheral nerve defects. *Adv. Sci. (Weinh)*. 2022;9(12):2103875. doi: 10.1002/advs.202103875
15. Fang Y., Wang Ch., Liu Z., Ko J., Chen L., Zhang T., Xiong Z., Zhang L., Sun W. 3D printed conductive multiscale nerve guidance conduit with hierarchical fibers for peripheral nerve regeneration. *Adv. Sci. (Weinh)*. 2023;10(12):e2205744. doi: 10.1002/advs.202205744
16. Huang Y., Wu W., Liu H., Chen Y., Li B., Gou Z., Li X., Gou M. 3D printing of functional nerve guide conduits. *Burns Trauma*. 2021;9:tkab011. doi: 10.1093/burnst/tkab011
17. Johnson B.N., Lancaster K.Z., Zhen G., He J., Gupta M.K., Kong Y.L., Engel E.A., Krick K.D., Ju A., Meng F., ... McAlpine M.C. 3D printed anatomical nerve regeneration pathways. *Adv. Funct. Mater.* 2015;25(39):6205–6217. doi: 10.1002/adfm.201501760
18. Zhang J., Tao J., Cheng H., Liu H., Wu W., Dong Y., Liu X., Gou M., Yang S., Xu J. Nerve transfer with 3D-printed branch nerve conduits. *Burns Trauma*. 2022;10:tkac010. doi: 10.1093/burnst/tkac010
19. Bolleboom A., de Ruiter G.C.W., Coert J.H., Tuk B., Holstege J.C., van Neck J.W. Novel experimental surgical strategy to prevent traumatic neuroma formation by combining a 3D-printed Y-tube with an autograft. *J. Neurosurg.* 2019;130(1):184–196. doi: 10.3171/2017.8.JNS17276
20. Shahriari D., Loke G., Tafel I., Park S., Chiang P.H., Fink Y., Anikeeva P. Scalable fabrication of porous microchannel nerve guidance scaffolds with complex geometries. *Adv. Mater.* 2019;31(30):1902021. doi: 10.1002/adma.201902021
21. Zennifer A., Thangadurai M., Sundaramurthi D., Sethuraman S. Additive manufacturing of peripheral nerve conduits – Fabrication methods, design considerations and clinical challenges. *SLAS Technol.* 2023;28(3):102–126. doi: 10.1016/j.slas.2023.03.006
22. Selim O.A., Lakhani S., Midha S., Mosahebi A., Kalaska D.M. Three-dimensional engineered peripheral nerve: toward a new era of patient-specific nerve repair solutions. *Tissue Eng. Part B: Rev.* 2022;28(2):295–335. doi: 10.1089/ten.teb.2020.0355
23. Zhang Y., Li X., Liu Y., Sun Y., Duan L., Zhang Y., Shi R., Yu X., Peng Zh. 3D SHINKEI MR neurography in evaluation of traumatic brachial plexus. *Sci. Rep.* 2024;14(1):6268. doi: 10.1038/s41598-024-57022-0

24. Chaker S.C., Reddy A.P., King D., Manzanera E.I.V., Thayer W.P. Diffusion tensor imaging techniques and applications for peripheral nerve injury. *Ann. Plast. Surg.* 2024; 93(3S Suppl 2):S113–S115. doi: 10.1097/SAP.0000000000004055
25. van Hoof T., Gomes G.T., Audenaert E., Verstraete K., Kerckaert I., D'herde K. 3D computerized model for measuring strain and displacement of the brachial plexus following placement of reverse shoulder prosthesis. *Anat. Rec. (Hoboken)*. 2008;291(9):1173–1185. doi: 10.1002/ar.20735
26. van de Velde J., Bogaert S., Vandemaele P., Huysse W., Achten E., Leijnse J., de Neve W., van Hoof T. Brachial plexus 3D reconstruction from MRI with dissection validation: a baseline study for clinical applications. *Surg. Radiol. Anat.* 2016;38(2):229–236. doi: 10.1007/s00276-015-1549-x
27. Zhao X., Zhao H., Zheng W., Gohritz A., Shen Y., Xu W. Clinical evaluation of augmented reality-based 3D navigation system for brachial plexus tumor surgery. *World J. Surg. Oncol.* 2024;22:20. doi: 10.1186/s12957-023-03288
28. Wake N., Lin Y., Tan E.T., Sneag D.B., Ianucci S., Fung M. 3D printing of the brachial plexus and its osseous landmarks using magnetic resonance neurography for thoracic outlet syndrome evaluation. *J. 3D Print. Med.* 2024;10(1):36. doi: 10.1186/s41205-024-00239-6

Сведения об авторах:

Горбунов Николай Станиславович, д.м.н., проф., ORCID: 0000-0003-4809-4491, e-mail: gorbunov_ns@mail.ru
Кобер Кристина Владимировна, к.м.н., ORCID: 0000-0001-5209-182X, e-mail: k-kober@mail.ru
Каспаров Эдуард Вильямович, д.м.н., проф., ORCID: 0000-0002-5988-1688, e-mail: rsimpn@scn.ru
Ростовцев Сергей Иванович, д.м.н., ORCID: 0000-0002-1462-7379, e-mail: rostovcev.1960@mail.ru
Горбунов Дмитрий Николаевич, к.м.н., ORCID: 0000-0002-5570-5425, e-mail: Dr_gorbunov@mail.ru
Лебедева Дарья Николаевна, ORCID: 0009-0004-6580-0591, e-mail: bolonevadasha@mail.ru
Никишаев Богдан Юрьевич, ORCID: 0009-0007-9852-0571, e-mail: okbovnik3@gmail.com

Information about the authors:

Nikolay S. Gorbunov, doctor of medical sciences, professor, ORCID: 0000-0003-4809-4491, e-mail: gorbunov_ns@mail.ru
Kristina V. Kober, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-0001-5209-182X, e-mail: k-kober@mail.ru
Eduard W. Kasparov, doctor of medical sciences, professor, ORCID: 0000-0002-5988-1688, e-mail: rsimpn@scn.ru
Sergey I. Rostovtsev, doctor of medical sciences, ORCID: 0000-0002-1462-7379, e-mail: rostovcev.1960@mail.ru
Dmitry N. Gorbunov, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-0002-5570-5425, e-mail: Dr_gorbunov@mail.ru
Darya N. Lebedeva, ORCID: 0009-0004-6580-0591, e-mail: bolonevadasha@mail.ru
Bogdan Yu. Nikishaev, ORCID: 0009-0007-9852-0571, e-mail: okbovnik3@gmail.com

Поступила в редакцию 20.12.2024
После доработки 23.12.2024
Принята к публикации 20.03.2025

Received 20.12.2024
Revision received 23.12.2024
Accepted 20.03.2025