

Вариантная анатомия трехмерных моделей плечевого сплетения в условиях дополненной и виртуальной реальности

Н.С. Горбунов^{1,2}, К.В. Кобер³, Э.В. Каспаров², С.И. Ростовцев¹, Д.Н. Горбунов¹,
Д.Н. Лебедева⁴, О.П. Галеева⁴

¹ Красноярский государственный медицинский университет им. профессора 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

Современные принципы хирургического восстановления поврежденных нервов при травмах плечевого сплетения требуют индивидуального и высококачественного хирургического планирования, основанного на анатомии конкретного пациента, а также точной навигации во время операции. Цель исследования – выявить соответствие вариантов строения плечевого сплетения на препаратах и трехмерных моделях для использования их в условиях дополненной и виртуальной реальности. **Материал и методы.** Созданы 44 трехмерные цифровые и полимерные модели правых плечевых сплетений от 22 трупов мужчин и женщин в возрасте 39–89 лет. Точность реконструкции проверили с помощью определения варианта строения плечевого сплетения у препаратов и трехмерных моделей. **Результаты и их обсуждение.** Созданные трехмерные цифровые и полимерные модели точно отражают варианты строения препаратов плечевого сплетения, но неодинаково – при наличии или отсутствии эпинеуря. На эпинеуральном уровне обнаружено семь вариантов строения препаратов и трехмерных моделей плечевого сплетения, а на перинеуральном – четыре. Выявленные варианты отличаются количеством спинно-мозговых нервов, особенностями строения разделений среднего и нижнего стволов. Все трехмерные цифровые модели плечевого сплетения переведены в формат STL и с помощью AR-очков спроецированы на поверхность тела человека в дополненной, а на разную глубину цифрового двойника – в виртуальной реальности. **Заключение.** Созданная база из 44 трехмерных цифровых и полимерных моделей семи и четырех вариантов строения плечевого сплетения на эпинеуральном и перинеуральном уровнях соответственно, проецирование их на конкретного пациента или цифрового двойника позволяют выполнять операции в условиях дополненной и виртуальной реальности.

Ключевые слова: трехмерные модели, плечевое сплетение, варианты строения, дополненная и виртуальная реальности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Для цитирования. Горбунов Н.С., Кобер К.В., Каспаров Э.В., Ростовцев С.И., Горбунов Д.Н., Лебедева Д.Н., Галеева О.П. Вариантная анатомия трехмерных моделей плечевого сплетения в условиях дополненной и виртуальной реальности. *Сиб. науч. мед. ж.* 2025;45(5):173–180. doi: 10.18699/SSMJ20250514

Variant anatomy of three-dimensional models of the brachial plexus in augmented and virtual reality

N.S. Gorbunov^{1,2}, K.V. Kober³, E.V. Kasparov², S.I. Rostovtsev¹, D.N. Gorbunov¹,
D.N. Lebedeva⁴, O.P. Galeeva⁴

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

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

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

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

Abstract

Modern surgical principles for repairing damaged nerves in brachial plexus injuries require individual and high-quality surgical planning based on the anatomy of a particular patient, as well as precise navigation during surgery. The aim of the study is to identify the correspondence of the variants of the brachial plexus structure on drugs and three-dimensional models for their use in augmented and virtual reality. **Material and methods.** 44 three-dimensional digital and polymer models of the right brachial plexuses were created from 22 corpses of men and women aged 39–89 years. The accuracy of the reconstruction was verified by determining the structural variant of the brachial plexus in the preparations and three-dimensional models. **Results and discussion.** The created three-dimensional digital and polymer models accurately reflect the structural variants of brachial plexus preparations, but not equally in the presence or absence of epineurium. At the epineural level, 7 variants of the structure of preparations and three-dimensional models of the brachial plexus were identified, and 4 at the perineural level. The identified variants differ in the number of spinal nerves and the structural features of the divisions of the middle and lower trunks. All three-dimensional digital models of the brachial plexus have been converted to the STL format and projected onto the surface of the human body using augmented reality and virtual reality to different depths of the digital twin. **Conclusions.** The created database of 44 three-dimensional digital and polymer models of 7 variants of the brachial plexus structure at the epineural and 4 at the perineural levels, projecting them onto a specific patient or a digital twin, allows performing operations in augmented and virtual reality conditions.

Key words: three-dimensional models, brachial plexus, structural variants, augmented and virtual 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., Galeeva O.P. Variant anatomy of three-dimensional models of the brachial plexus in augmented and virtual reality. *Sibirskij nauchnyj medicinskij zhurnal* = *Siberian Scientific Medical Journal*. 2025;45(5):173–180. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20250514

Введение

Трехмерные модели, дополненная и виртуальная реальности привели к революционным улучшениям в понимании анатомии и патологии, совершенствованию хирургических вмешательств [1, 2]. Наложение цифровых трехмерных объектов и погружение в высокореалистичную трехмерную искусственную среду позволяют лучше визуализировать анатомические структуры и контролировать свои действия, повышают хирургическую точность, сокращают время операции [3–5]. Основой данных цифровых технологий являются трехмерные модели, напечатанные для конкретного пациента [6]. Однако процесс создания моделей, особенно таких сложных анатомических структур, как плечевое сплетение [7–9], требует точного соответствия с прототипом и занимает много времени, что затрудняет инте-

грацию технологий в клиническую практику [10]. Травмы плечевого сплетения или сдавление его опухолями еще больше усложняют диагностику, а лечение является трудной задачей хирургии [11, 12].

В связи с этим постоянно совершенствуются методы магнитно-резонансной (МР) визуализации, которые позволили получить превосходное пространственное и контрастное разрешение всех элементов плечевого сплетения, но только на эпинеуральном уровне [13, 14, 15]. Значительные достижения и недостатки методов визуализации отразились и на процессе создания трехмерных моделей. Разработана методика изготовления цифровых моделей плечевого сплетения трупов после введения свинцовых маркеров под эпиневию с последующей компьютерной томографией, которая не может использоваться у живых людей [16]. Создана методика детальной

трехмерной реконструкции плечевого сплетения с помощью МР-томографии, которая позволяет у людей определить его индивидуальную анатомию с максимально возможной детализацией и точностью, но требует участия нескольких специалистов и занимает длительное время [17]. В литературе встречаются также единичные работы о 3D-печати плечевого сплетения конкретного пациента после МР-нейрографии [18, 19].

Таким образом, усовершенствование методов визуализации и создание трехмерных моделей все больше приближает нас к моменту широкого внедрения цифровых технологий в хирургию плечевого сплетения [20]. Однако до настоящего времени еще остаются серьезные трудности, одной из которых является ограниченные возможности визуализации скрытого эпиневрием пучкового строения этой анатомической структуры.

Целью настоящего исследования послужило выявление соответствия вариантов строения плечевого сплетения на препаратах и трехмерных моделях для использования их в условиях дополненной и виртуальной реальности.

Материал и методы

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 проведено препарирование правого плечевого сплетения у 22 трупов мужчин и женщин в возрасте 39–89 лет. Во всех случаях причиной смерти являлись общесоматические заболевания, трупы хранились в холодильной камере при температуре 3–5 °С не более 20 ч. Исследование одобрено этическим комитетом Красноярского государственного медицинского университета им. профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого (протокол № 127/24 от 25.09.2024).

Каждый препарат плечевого сплетения размещали на вращающейся платформе и сканировали с помощью EinScan-SE (Shining 3D, КНР) дважды: с эпиневрием и после его удаления, 44 цифровые модели плечевого сплетения изготавливали с использованием программ Ex Scan 3.1.3 (КНР), Photon v2.1.24 (КНР), Chitubox Pro (КНР). Цифровые модели плечевого сплетения распечатывали на принтере Sonic XL 4K (Phrozen, Тайвань) с разрешением матрицы 5800×4000. В качестве исходного материала использовали белую фотополимерную смолу Anycubic UV Sensitive (Anycubic, КНР).

В заключение проведено сравнительное исследование вариантов строения плечевого сплетения на препаратах и трехмерных полимерных моделях, которые определялись на основании количества спинно-мозговых нервов, особенностей формирования ими стволов, способа образования разделений и пучков. Для наглядности отображения вариантов строения использовали обратную систему их кодирования в направлении: пучок←разделение←ствол (спинномозговой нерв) [21]. Созданные цифровые модели переведены в формат STL (унифицированный формат, используемый в AR-очках) и спроецированы на поверхность тела и в глубину раны с помощью AR-очков Hololens 2 (Microsoft, США) в дополненной и виртуальной реальностях.

Полученные данные внесены в программу MS Excel 12 (Microsoft), в которой общая выборка разделена на две группы по наличию и отсутствию эпиневрия, на варианты строения плечевого сплетения. Значимость (при $p < 0,05$) различий между долевым соотношением разных вариантов строения определяли по z-критерию Фишера.

Результаты

Установлено, что трехмерные полимерные модели точно отражают варианты строения препаратов плечевого сплетения, но неодинаково – при наличии или отсутствии эпиневрия. На эпиневральном уровне таких вариантов выявлено семь (табл. 1). Классический вариант строения плечевого сплетения, описанный во всех учебниках, на эпиневральном уровне отсутствует. Обнаруженные варианты отличаются количеством спинномозговых нервов и особенностями строения разделений среднего и нижнего стволов. Одинаково чаще (16 препаратов и моделей из 22) плечевое сплетение формируют спинно-мозговые нервы C5, C6, C7, C8, Th1 (варианты 1, 2, 5, 6) и значимо ($p < 0,01$) реже (6 из 22) добавляется C4 (варианты 3, 4, 7).

У половины препаратов и трехмерных полимерных моделей выявляются передние и задние разделения у верхнего и нижнего стволов, а у среднего – только переднее разделение и не определяется заднее (рис. 1). Следовательно, задний пучок формируется путем слияния заднего разделения верхнего ствола со средним стволом и задним разделением нижнего ствола (варианты 1, 4, 6). У другой половины препаратов и моделей передние и задние разделения выявляются у верхнего и среднего стволов, а у нижнего – только переднее и не идентифицируется заднее. Следовательно, задний пучок формируется путем объединения задних разделений верхнего и среднего

Таблица 1. Варианты строения препаратов и трехмерных полимерных моделей плечевого сплетения на эпинеуральном уровне (n = 22)**Table 1.** Variants of the structure of preparations and three-dimensional polymer models of the brachial plexus at the epineural level (n = 22)

№	Код варианта: Пучок←Разделение→Ствол (Спинно-мозговой нерв)	Количество	
		Препарат	Модель
1	ЛП←ПР-BC(C5, C6)+ПР-CC(C7); МП←ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-BC(C5, C6)+CC(C7)+ЗР-НС(C8, Th1)	8	8
2	ЛП←ПР-BC(C5, C6)+ПР-CC(C7); МП←ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-BC(C5, C6)+ЗР-CC(C7)+НС(C8, Th1)	5	5
3	ЛП←ПР-BC(C4, C5, C6)+1ПР-CC(C7); МП←2ПР-CC(C7)+ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-BC(C4, C5, C6)+ЗР-CC(C7)+НС(C8, Th1)	3	3
4	ЛП←ПР-BC(C4, C5, C6)+ПР-CC(C7); МП←ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-BC(C4, C5, C6)+CC(C7)+ЗР-НС(C8+Th1)	2	2
5	ЛП←ПР-BC(C5, C6)+1ПР-CC(C7); МП←2ПР-CC(C7)+ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-BC(C5, C6)+ЗР-CC(C7)+НС(C8+Th1)	2	2
6	ЛП←ПР-BC(C5, C6)+1ПР-CC(C7); МП←2ПР-CC(C7)+ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-BC(C5, C6)+CC(C7)+ЗР-НС(C8+Th1)	1	1
7	ЛП←ПР-BC(C4, C5, C6)+ПР-CC(C7); МП←ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-BC(C4, C5, C6)+ЗР-CC(C7)+НС(C8, Th1)	1	1

Примечание. ЛП – латеральный, МП – медиальный и ЗП – задний пучки; ПР – переднее и ЗР – заднее разделения; BC – верхний, CC – средний и НС – нижний стволы; C4, C5, C6, C7, C8, Th1 – вентральные ветви спинно-мозговых нервов.

стволов с нижним стволом (варианты 2, 3, 5, 7). В большинстве случаев (16 препаратов и моделей из 22) переднее разделение среднего ствола участвует в формировании латерального пучка, а значительно реже (6 из 22) ($p < 0,01$) раздваивается и переходит в латеральный и медиальный пучки (варианты 3, 5, 6).

После удаления эпиневрия препараты и трехмерные полимерные модели более детализированно отражают четыре варианта строения плечевого сплетения (табл. 2). Классический вариант строения встречается одинаково чаще ($p < 0,01$) – у девяти препаратов и моделей (вариант 1). В отличие от эпинеурального, на пери-

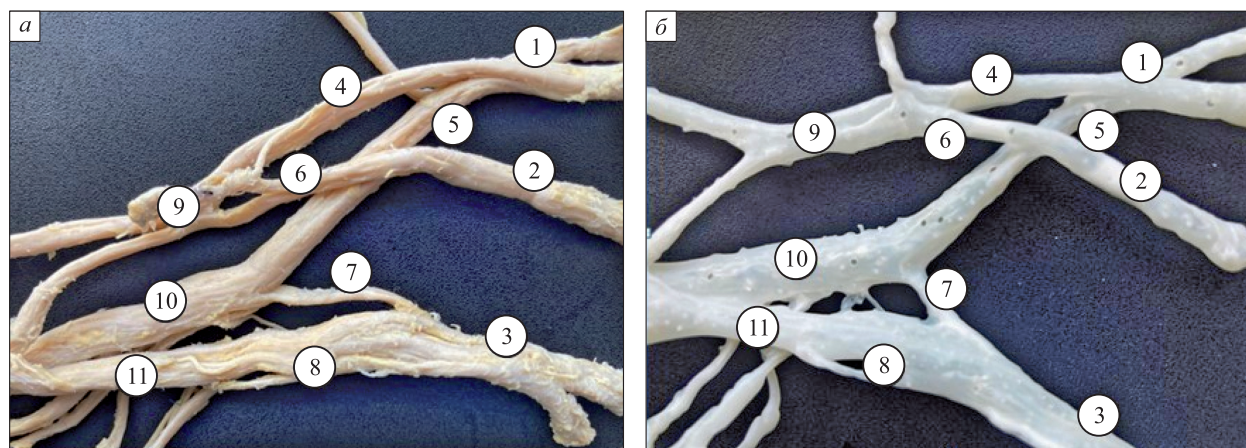


Рис. 1. Препарат (а) и трехмерная полимерная модель (б) правого плечевого сплетения с эпиневрием; 1 – верхний, 2 – средний и 3 – нижний стволы, 4 – переднее и 5 – заднее разделения верхнего ствола, 6 – переднее разделение среднего ствола, 7 – заднее и 8 – переднее разделения нижнего ствола, 9 – латеральный, 10 – задний и 11 – медиальный пучки

Fig. 1. Preparation (a) and three-dimensional polymer model (b) of the right brachial plexus with epineurium; 1 – upper, 2 – middle and 3 – lower trunks, 4 – anterior and 5 – posterior divisions of the upper trunk, 6 – anterior division of the middle trunk, 7 – posterior and 8 – anterior divisions of the lower trunk, 9 – lateral, 10 – posterior and 11 – medial bundles

Табл. 2. Варианты строения препаратов и трехмерных полимерных моделей плечевого сплетения на перинеуральном уровне ($n = 22$)**Tabl. 2.** Variants of the structure of preparations and three-dimensional polymer models of the brachial plexus at the perineural level ($n = 22$)

№	Код варианта: Пучок←Разделение→Ствол (Спинно-мозговой нерв)	Количество	
		Препарат	Модель
1	ЛПП←ПР-ВС(C5, C6)+ПР-СС(C7); МП←ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-ВС(C5, C6)+СС(C7)+ЗР-НС(C8, Th1)	9	9
2	ЛПП←ПР-ВС(C5, C6)+1ПР-СС(C7); МП←2ПР-СС(C7)+ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-ВС(C5, C6)+ЗР-СС(C7)+ЗР-НС(C8, Th1)	7	7
3	ЛПП←ПР-ВС(C4, C5, C6)+ПР-СС(C7); МП←ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-ВС(C4, C5, C6)+ЗР-СС(C7)+ЗР-НС(C8, Th1)	3	3
4	ЛПП←ПР-ВС(C4, C5, C6)+1ПР-СС(C7); МП←2ПР-СС(C7)+ПР-НС(C8, Th1); ЗП←ЗР-ВС(C4, C5, C6)+ЗР-СС(C7)+ЗР-НС(C8, Th1)	3	3

Примечание. ЛПП – латеральный, МП – медиальный и ЗП – задний пучки, ПР – переднее и ЗР – заднее разделения, ВС – верхний, СС – средний и НС – нижний стволы, C4, C5, C6, C7, C8, Th1 – вентральные ветви спинно-мозговых нервов.

невральном уровне передние и задние разделения верхнего, среднего и нижнего стволов определяются у всех препаратов и трехмерных моделей ($p < 0,01$). Раздвоение переднего разделения среднего ствола встречается в 10 случаях (варианты 2, 4), что в 1,7 раза чаще, чем на эпинеуральном (рис. 2). Добавочная веточка, отходящая от латеральной пучка к локтевому нерву, встречается в 5

раз чаще, чем у препаратов и моделей, покрытых эпиневрием (рис. 3).

Все трехмерные цифровые модели плечевого сплетения с помощью программы Chitubox Pro переведены в формат STL и в ручном режиме выстроены оси и плоскости для их последующего перемещения. Для проекции цифровой модели плечевого сплетения на кожу шеи и пояса верхней конечности конкретного пациента мы используем

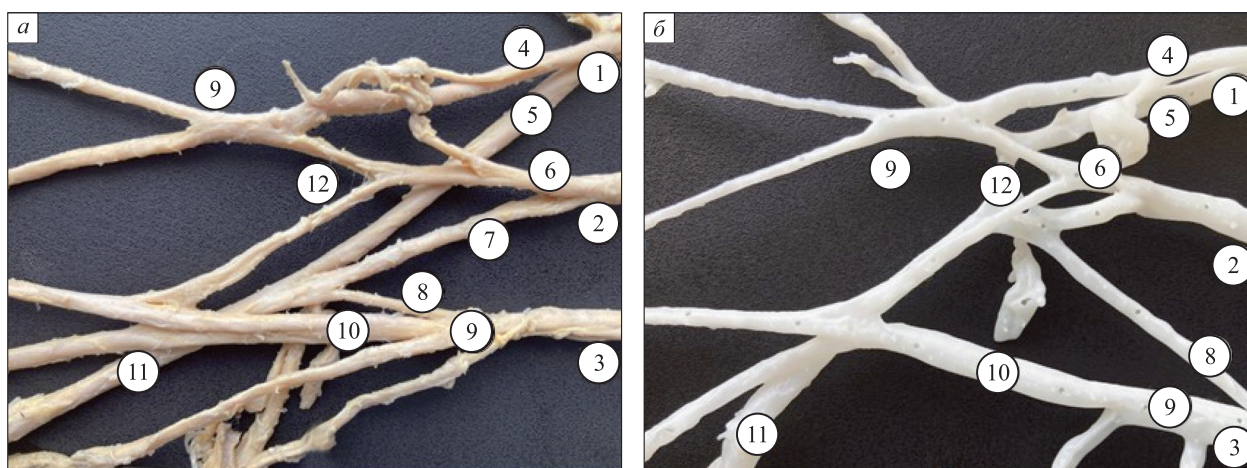


Рис. 2. Вариант строения переднего разделения среднего ствола правого плечевого сплетения без эпиневрия на препарате (а) и трехмерной полимерной модели (б): 1 – верхний, 2 – средний и 3 – нижний стволы, 4 – переднее и 5 – заднее разделения верхнего ствола, 6 – переднее и 7 – заднее разделения среднего ствола, 8 – переднее и заднее разделения нижнего ствола, 9 – латеральный, 10 – медиальный и 11 – задний пучки, 12 – раздвоение переднего разделения среднего ствола

Fig. 2. A variant of the structure of the anterior division of the middle trunk of the right brachial plexus without an epineurium on the preparation (a) and a three-dimensional polymer model (b): 1 – upper, 2 – middle and 3 – lower trunks, 4 – anterior and 5 – posterior divisions of the upper trunk, 6 – anterior and 7 – posterior divisions of the middle trunk, 8 – anterior and posterior divisions of the lower trunk, 9 – lateral, 10 – medial and 11 – posterior bundles, 12 – bifurcation anterior division of the middle trunk

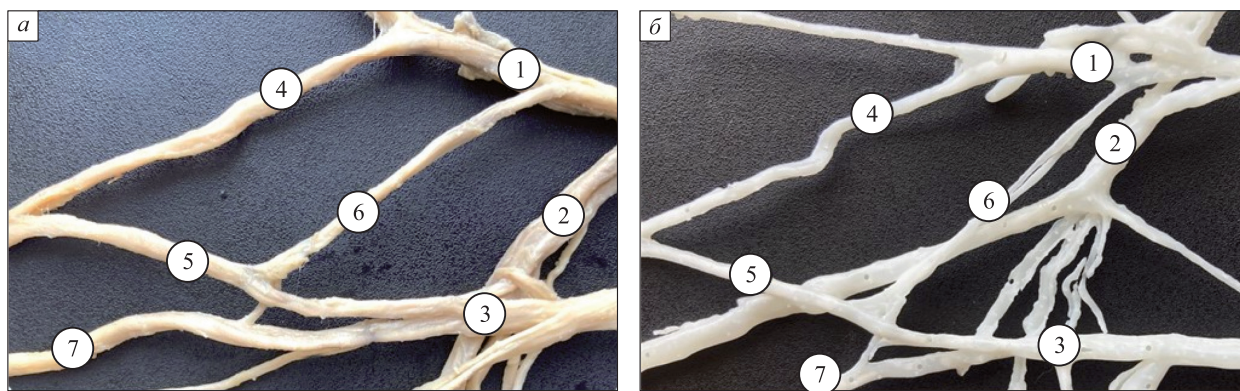


Рис. 3. Вариант строения латерального пучка правого плечевого сплетения без эпинеурия на препарате (а) и трехмерной полимерной модели (б): 1 – латеральный, 2 – задний и 3 – медиальный пучки, 4 – латеральный и 5 – медиальный корешки срединного нерва, 6 – добавочная ветвь от латерального пучка к локтевому нерву, 7 – локтевой нерв

Fig. 3. A variant of the structure of the lateral bundle of the right brachial plexus without epineurium on the preparation (a) and a three-dimensional polymer model (б): 1 – lateral, 2 – posterior and 3 – medial bundles, 4 – lateral and 5 – medial roots of the median nerve, 6 – an additional branch from the lateral bundle to the ulnar nerve, 7 – ulnar nerve

равные положительные (рис. 4, а), а для позиционирования в глубину раны, на ребра цифрового двойника – отрицательные значения смещения по оси аппликата (рис. 4, б). Позиционирование цифровых моделей плечевого сплетения в условиях дополненной и виртуальной реальностей легко редактируется в специальных программах, а во

встроенных программах осуществляется их просмотр и проецирование с помощью AR-очков.

Обсуждение

Знание особенностей строения плечевого сплетения пациента является краеугольным камнем использования современных цифровых тех-

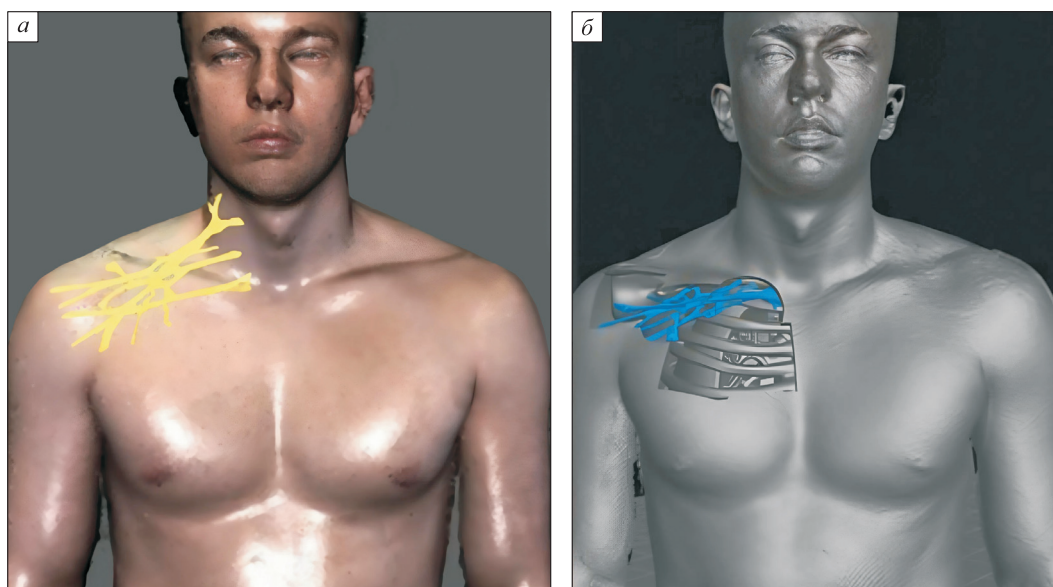


Рис. 4. Проецирование цифровых трехмерных моделей плечевого сплетения на кожу пациента в условиях дополненной реальности (а) и в глубину, на ребра цифрового двойника, – в виртуальной реальности (б)

Fig. 4. Projection of digital three-dimensional models of the brachial plexus onto the patient's skin in augmented reality and in depth (а), onto the ribs of a digital twin in virtual reality (б)

нологий в клинической практике [19, 20]. Визуализировать и создать цифровую модель плечевого сплетения конкретного больного на перинеуральном уровне в настоящее время не представляется возможным. Для решения данной проблемы нами создан полный комплект (база) всех вариантов максимально детализированных и идентичных оригиналу трехмерных цифровых и полимерных моделей плечевого сплетения на эпинеуральном и перинеуральном уровнях. Количество вариантов строения препаратов и моделей отличается при наличии и отсутствии у плечевого сплетения эпинеурии. Это связано с тем, что эпинеурия плечевого сплетения обеспечивает взаимосвязь с окружающими структурами, особенно с такими динамичными, как сосуды, а перинеурия – это внутренний соединительнотканый скелет [22]. Внешние взаимоотношения плечевого сплетения разнообразнее по характеру, направлению и силе, что способствует формированию большего количества вариантов [23]. Более выраженный эпинеурий маскирует внутреннюю разветвленную структуру и не позволяет выявить истинный вариант строения плечевого сплетения [24].

Созданная база цифровых моделей адаптирована к импорту результатов МРТ обследования конкретного пациента и визуализации его плечевого сплетения с помощью программы 3D-Slicer. Полученные данные анализируются, вариант строения идентифицируется по алгоритму: определение количества спинно-мозговых нервов, наличия заднего разделения у среднего и нижнего стволов, раздвоения переднего разделения верхнего ствола. Далее выбранный вариант плечевого сплетения автоматически загружается в программу AR-очков, проецируется на кожу и рану конкретного пациента в условиях дополненной реальности или пространственно позиционируется в теле цифрового двойника в условиях виртуальной реальности.

Заключение

Созданная база из 44 трехмерных цифровых и полимерных моделей семи и четырех вариантов строения плечевого сплетения на эпинеуральном и перинеуральном уровнях соответственно, проецирование их на конкретного пациента или цифрового двойника позволяют выполнять операции в условиях дополненной и виртуальной реальности.

Список литературы / References

1. Moldovanu C.G. Virtual and augmented reality systems and three-dimensional printing of the renal model novel trends to guide preoperative planning for renal cancer. *Asian J. Urol.* 2024;11(4):521–529. doi: 10.1016/j.ajur.2023.10.004
2. Boul-Atarass I.L., Franco C.C., Sierra J.D.S., Monsalve J.C., Ruiz J.P. Virtual 3D models, augmented reality systems and virtual laparoscopic simulations in complicated pancreatic surgeries: state of art, future perspectives, and challenges. *Int. J. Surg.* 2025;111(3):2613–2623. doi: 10.1097/JS9.0000000000002231
3. Sullivan J., Skladman R., Varagur K., Tenenbaum E., Sacks J.L., Martin C., Gordon T., Murphy J., Moritz W.R., Sacks J.M. from augmented to virtual reality in plastic surgery: blazing the trail to a new frontier. *J. Reconstr. Microsurg.* 2024;40(5):398–406. doi: 10.1055/a-2199-3870
4. Barcali E., Iadanza E., Manetti L., Francia P., Nardi C., Bocchi L. Augmented reality in surgery: a scoping review. *Appl. Sci.* 2022;12(14):6890. doi: 10.3390/app12146890
5. Ock J., Moon S., Kim M., Ko B.S., Kim N. Evaluation of the accuracy of an augmented reality-based tumor-targeting guide for breast-conserving surgery. *Comput. Methods Programs Biomed.* 2024;245:108002. doi: 10.1016/j.cmpb.2023.108002
6. Naito K., Ohana M., Lequent T., Facca S., Liverneux Ph. Brachial Plexus. In: *Telemicrosurgery: robot assisted microsurgery*. Paris: Springer, 2012. P. 123–136. doi: 10.1007/978-2-8178-0391-3
7. Gilcrease-Garcia B.M., Deshmukh S.D., Parsons M.S. Anatomy, imaging, and pathologic conditions of the brachial plexus. *RadioGraphics.* 2020;40(6):1686–1714. doi: 10.1148/rg.2020200012
8. Gesslbauer B., Hruby L.A., Roche A.D., Farina D., Blumer R., Aszmann O.C. Axonal components of nerves innervating the human arm. *Ann. Neurol.* 2017;82(3):396–408. doi: 10.1002/ana.25018
9. Davidson E.J., Tan E.T., Pedrick E.G., Sneg D.B. Brachial plexus magnetic resonance neurography technical challenges and solutions. *Invest. Radiol.* 2023;58(1):14–27. doi: 10.1097/RLI.0000000000000906
10. Riedel P., Riesner M., Wendt K., Assmann U. Data-Driven Digital Twins in Surgery utilizing Augmented Reality and Machine Learning: proc. conf., 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), IEEE; 2022. P. 580–585. doi: 10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814537
11. Shekouhi R., Chim H. Patient demographics, tumor characteristics, and outcomes following surgical treatment of benign and malignant brachial plexus tumors: a systematic review. *Int. J. Surg.* 2023;109(4):972–981. doi: 10.1097/JS9.0000000000000309
12. 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(1):20. doi: 10.1186/s12957-023-03288-z

13. 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
14. 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):S113–S115. doi: 10.1097/SAP.0000000000004055
15. Colucci P.G., Gao M.A., Tan E.T., Queler S., Belanger M., Tsai J., Carrino J.A., Sneag D.B. Development of an interactive ultra-high resolution magnetic resonance neurography atlas of the brachial plexus and upper extremity peripheral nerves. *Clin. Imaging.* 2025;119:110400. doi: 10.1016/j.clinimag.2024.110400
16. 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
17. van de Velde J., Bogaert S., Vandemaele P., Huyse 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;38:229–236. doi: 10.1007/s00276-015-1549-x
18. Perruisseau-Carrier A., Bahlouli N., Bierry G., Vernet P., Facca S., Liverneaux P. Comparison between isotropic linear-elastic law and isotropic hyperelastic law in the finite element modeling of the brachial plexus. *Ann. Chirur. Plast. Esthét.* 2017;62(6):664–668. doi: 10.1016/j.anplas.2017.03.002
19. Wake N., Lin Y., Ek Tan 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
20. Rosen J.M., Hong J., Klaudt-Moreau J., Podsednik A., Hentz V.R. Frontiers of brachial plexus injury: future revolutions in the field. In: *Brachial Plexus Injury – New Techniques and Ideas*. London, 2022. P. 145–163. doi: 10.5772/intechopen.99209
21. Горбунов Н.С., Кобер К.В., Каспаров Э.В., Ростовцев С.И. Вариантная анатомия и коды плечевого сплетения человека. *Казан. мед. ж.* 2023;104(1):62–71. doi: 10.17816/KMJ106979
- Gorbunov N.S., Kober K.V., Kasparov E.V., Rostovtsev S.I. Variant anatomy and codes of the human brachial plexus. *Kazanskiy meditsinskiy zhurnal = Kazan Medical Journal.* 2023;104(1):62–71. [In Russian]. doi: 10.17816/KMJ106979
22. Reina M.A., Boezaart A.P., Tubbs R.S., Zsimovich Y., Fernández-Domínguez M., Fernández P., Sala-Blanch X. Another (internal) epineurium: beyond the anatomical barriers of nerves. *Clin. Anat.* 2020;33(2):199–206. doi: 10.1002/ca.23442
23. Leijnse J.N., Bakker B.S., D'Herde K. The brachial plexus – explaining its morphology and variability by a generic developmental model. *J. Anat.* 2020;236(5):862–882. doi: 10.1111/joa.13123
24. Qin B., Fu G., Yang J., Wang Y., Zhu Q., Liu X., Zhu J., Gu L. Microanatomy of the Separable Length of the C7. *J. Reconstr. Microsurg.* 2016;32(2):109–113. doi: 10.1055/s-0035-1563380

Сведения об авторах:

Горбунов Николай Станиславович, д.м.н., проф., ORCID: 0009-0003-2542-0247, 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
Галеева Ольга Павловна, ORCID: 0000-0001-5153-2566, e-mail: olenkagaleeva1951@mail.ru

Information about authors:

Nikolay S. Gorbunov, doctor of medical sciences, professor, ORCID: 0009-0003-2542-0247, 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 V. 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
Olga P. Galeeva, ORCID: 0000-0001-5153-2566, e-mail: olenkagaleeva1951@mail.ru

Поступила в редакцию 27.05.2025
 После доработки 17.06.2025
 Принята к публикации 22.09.2025

Received 27.05.2025
 Revision received 17.06.2025
 Accepted 22.09.2025