

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ В НЕЙРОХИРУРГИИ, ВЕРТЕБРОЛОГИИ, ТРАВМАТОЛОГИИ И ОРТОПЕДИИ

© А.В. Яриков^{1,2}, Р.О. Горбатов^{3,4}, А.А. Денисов⁵, И.И. Смирнов², А.П. Фраерман², А.Г. Соснин¹, О.А. Перльмуттер², А.А. Калинин⁶

¹ Приволжский окружной медицинский центр Федерального медико-биологического агентства, Нижний Новгород, Российская Федерация

² Городская клиническая больница № 39, Нижний Новгород, Российская Федерация

³ Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Российская Федерация

⁴ ООО «Гито-Инновация», Нижний Новгород, Российская Федерация

⁵ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Р.Р. Вредена, Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁶ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Российская Федерация

Аддитивные технологии в настоящее время находят широкое применение в различных областях клинической медицины. В частности, широкое распространение 3D-печать получила в нейрохирургии, вертеб্রологии и травматологии-ортопедии. В статье подробно изложены основные принципы медицинской 3D-печати; дана современная классификация 3D-принтеров (FDM, SLA, SLS и др.), основанных на принципах печати. Изложены основные преимущества и недостатки вышеперечисленных 3D-принтеров и области клинической медицины, в которых они применяются. Представлен опыт применения 3D-печати с учетом данных современной научной литературы. Особая роль уделена использованию 3D-печати в изготовлении индивидуальных имплантатов при краниопластиках. Технологии 3D-печати в реконструктивной нейрохирургии дают возможность создания высокоточных имплантатов, снижения времени оперативного вмешательства и улучшения эстетического эффекта операции. Приведены данные современной литературы о применении 3D-печати в вертеб্রологии, где особая роль уделена направлятелям для установки транспедикулярных винтов и индивидуальным лордозизирующим кейджам. Применение индивидуальных направлятелей, особенно при тяжелых деформациях позвоночника, позволяет снизить риск мальпозиции металлоконструкции и длительность оперативного вмешательства. Широкое распространение данная методика получила также в травматологии и ортопедии, где при помощи 3D-печати создаются индивидуальные имплантаты из титана и костнозамещающего материала, благодаря которым появилась возможность замещения любых по форме, сложности и размерам костных дефектов и создания гибридных экзопротезов. Описана роль 3D-моделирования и 3D-печати в обучении медицинских кадров на современном этапе. Представлен собственный опыт применения 3D-моделирования и 3D-печати в реконструктивной нейрохирургии и вертеб্রологии.

Ключевые слова: аддитивные технологии; персонифицированная медицина; 3D-печать; 3D-моделирование; 3D-печать в медицине; предоперационные макеты.

Для цитирования: Яриков А.В., Горбатов Р.О., Денисов А.А., Смирнов И.И., Фраерман А.П., Соснин А.Г., Перльмуттер О.А., Калинин А.А. Применение аддитивных технологий 3D-печати в нейрохирургии, вертеб্রологии, травматологии и ортопедии. *Клиническая практика*. 2021;12(1):90–104. doi: 10.17816/clinpract64944

Поступила 01.02.2021

Принята 16.02.2021

Опубликована 01.04.2021

ОБОСНОВАНИЕ

XXI век продолжает удивлять нас новыми технологиями, которые постепенно внедряются в медицину [1–3]. Одним из интересных и полезных достижений последнего времени является 3D-печать

(3D printing, 3DP), которая в настоящее время стала доступна всем желающим [4–6]. 3D-принтер — это устройство, позволяющее на основе разработанной компьютерной модели изготовить полностью идентичный объект [5–8]. Аддитивные технологии

Список сокращений

МСКТ — мультиспиральная компьютерная томография	FDM (fused deposition modeling) — технология послойного наплавления
ТПВ — транспедикулярный винт	LOM (laminated object manufacturing) — изготовление объектов методом ламинирования
3DP (3D-printing) — трехмерная печать	SLA (laser stereolithography) — лазерная стереолитография
3DM — 3D-модели	SLM (selective laser melting) — выборочная лазерная плавка
DLMS (direct laser metal sintering) — прямое лазерное спекание металлов	SLS (selective laser sintering) — выборочное лазерное спекание
DLP (digital light processing) — цифровая светодиодная проекция	
EBM (electronbeam melting) — электронно-лучевая плавка	

APPLICATION OF ADDITIVE 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN NEUROSURGERY, VERTEBROLOGY AND TRAUMATOLOGY AND ORTHOPEDICS

© A.V. Yarikov^{1,2}, R.O. Gorbatov^{3,4}, A.A. Denisov⁵, I.I. Smirnov², A.P. Fraerman², A.G. Sosnin¹, O.A. Perlmutter², A.A. Kalinkin⁶

¹ Privolzhsky District Medical Center FMBA of Russia, Nizhny Novgorod, Russian Federation

² City Clinical Hospital No. 39, Nizhny Novgorod, Russian Federation

³ Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

⁴ LLC "Gito-Innovation", Nizhny Novgorod, Russian Federation

⁵ Vreden National Medical Center for Traumatology and Orthopedics, Saint Petersburg, Russian Federation

⁶ Federal Scientific and Clinical Center for Specialized Medical Assistance and Medical Technologies of the Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russian Federation

Additive technologies are now widely used in various fields of clinical medicine. In particular, 3D printing is widely used in neurosurgery, vertebrology and traumatology-orthopedics. The article describes in detail the basic principles of medical 3D printing. The modern classification of 3D printers is presented based on the following principles of printing: FDM, SLA, SLS and others. The main advantages and disadvantages of the above-mentioned 3D printers and the areas of clinical medicine in which they are used are described. Further in the review, the authors discuss the experience with 3D printing applications, based on the data of the modern scientific literature. A special attention is paid to the use of 3D printing in the manufacture of individual implants for cranioplasty. 3D printing technologies in reconstructive neurosurgery make it possible to create high-precision implants, reduce the time of surgical intervention and improve the aesthetic effect of the operation. The article also presents the data of the modern literature on the use of 3D printing in vertebrology, where a special role is given to the use of guides for the installation of transpedicular screws and the use of individual lordosing cages. The use of individual guides, especially for severe spinal deformities, reduces the risk of metal structure malposition and the duration of surgical intervention. This technique is also widely used in traumatology and orthopedics, where individual implants made of titanium, a bone-substituting material, are created using 3D printing, thanks to which it is possible to replace bone defects of any shape, complexity and size and create hybrid exoprostheses. The role of 3D modeling and 3D printing in the training of medical personnel at the present stage is described. In conclusion, the authors present their experience of using 3D modeling and 3D printing in reconstructive neurosurgery and vertebrology.

Keywords: additive technologies; personalized medicine; 3D printing; 3D modeling; 3D printing in medicine; preoperative layouts.

For citation: Yarikov AV, Gorbatov RO, Denisov AA, Smirnov II, Fraerman AP, Sosnin AG, Perlmutter OA, Kalinkin AA. Application of Additive 3D Printing Technologies in Neurosurgery, Vertebrology and Traumatology and Orthopedics. *Journal of Clinical Practice*. 2021;12(1):90–104. doi: 10.17816/clinpract64944

Submitted 01.02.2021

Revised 16.02.2021

Published 01.04.2021

(прототипирование) отличаются от традиционных способов изготовления изделий, которые основаны на вычитании (фрезеровка, шлифование) и формообразовании (литье, штамповка) материала, тем, что построение объекта происходит послойно путем добавления материала [9, 10]. Медицинское прототипирование в настоящее время используется в различных областях медицины [11, 12], однако особенно активно в последнее время 3DP применяется в нейрохирургии, вертебрологии, травматологии, ортопедии, челюстно-лицевой и пластической хирургии [13–15]. С каждым годом увеличивается количество материалов для медицинских 3D-принтеров, появляются материалы с новыми свойствами, совершенствуются технологии 3DP. Производство индивидуальных медицинских изделий становится все более доступным, простым и дешевым [2, 16]. В период с 1988 по 2015 г. среднегодовой темп прироста рынка 3DP составил 26,2% [10].

ОСНОВЫ МЕДИЦИНСКОЙ 3DP

С целью создания индивидуального медицинского изделия на первом этапе пациенту проводится мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) с шагом 1–2 мм [17, 18]. В результате исследования получают послойные срезы обследуемого органа, которые экспортируются в виде серии цифровых снимков в формате DICOM в программу для построения 3D-модели (3DM) [19]. На втором этапе с использованием специализированного программного обеспечения создается объемная полигональная 3DM [20, 21]. Далее возможно ее изготовление на 3D-принтере либо выполнение компьютерного моделирования с созданием 3DM-имплантата, хирургического шаблона и др. После завершения этапа компьютерного моделирования осуществляется аддитивное производство индивидуального медицинского изделия [22]. Для получения данных с целью создания 3DM-изделия возможно использовать 3D-сканирование, измерение антропометрических параметров пациента и т.д. [2].

Существует множество различных методов 3DP [11–23]. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

I. Экструзионный:

- технология послойного наплавления (fused deposition modeling, FDM).

II. Фотополимеризация:

- лазерная стереолитография (laser stereolithography, SLA);

- цифровая светодиодная проекция (digital light processing, DLP).

III. Порошковый:

- электронно-лучевая плавка (electronbeam melting, EBM);
- выборочная лазерная плавка (selective laser melting, SLM);
- выборочное лазерное спекание (selective laser sintering, SLS);
- прямое лазерное спекание металлов (direct laser metal sintering, DLMS).

IV. Ламинирование:

- изготовление объектов методом ламинирования (laminated object manufacturing, LOM).

V. Струйный:

- струйная трехмерная печать (three-dimensional printing, 3DP).

Выбор оптимальной технологии 3DP в каждой клинической ситуации зависит от требований, предъявляемых к изготавливаемому индивидуальному изделию медицинского назначения, скорости и стоимости его производства [24, 25]. Для этого необходимо учитывать особенности различных технологий 3DP, применяемых в медицине (табл. 1) [26–28].

SLA-, SLS- и DLMS 3DP идентичны по точности получаемых биомоделей, но являются в разы более дорогостоящими по сравнению с FDM [23, 27].

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ 3DP В НЕЙРОХИРУРГИИ, ВЕРТЕБРОЛОГИИ, ТРАВМАТОЛОГИИ И ОРТОПЕДИИ Нейрохирургия

Моделирование формы имплантата для краниопластики раньше в большинстве случаев проводилось непосредственно во время операции, что значительно увеличивало ее продолжительность [29, 30]. В ситуациях, когда дефекты затрагивали верхние отделы лицевого скелета (край орбиты, скуловой отросток, воздухоносные пазухи), интраоперационное формирование имплантата было очень затруднительным и не позволяло прецизионно достичь желаемого косметического результата [31–33]. При пластике дефектов черепа в настоящее время все чаще применяются аддитивные технологии, обеспечивающие возможность изготовления индивидуальных высокоточных имплантатов (рис. 1) [2, 34, 35], что позволяет достичь наилучших косметических результатов, сократить время нейрохирургического вмешательства и повысить удовлетворенность пациента результатом [32, 36,

Таблица 1 / Table 1

Особенности различных технологий 3DP
Specifics of different 3DP technologies

Технология	Основные принципы	Материал	Средняя стоимость	Преимущества	Недостатки	Область применения в медицине
FDM	3DP происходит за счет экструзии быстрозатвердевающего материала. В экструдере 3D-принтера термопластик нагревается до температуры плавления с последующим выдавливанием жидкой массы через печатающее сопло. Экструдер движется по траектории, соответствующей структуре и форме изделия, что формирует единичный слой. Создание изделия происходит последовательным нанесением слоев поверх уже напечатанных	Термопластик	Оборудование: 20–400 тыс. руб. Материал: 1–10 тыс. руб./кг	При 3DP применяются недорогие расходные материалы. Высокая доступность данного вида 3DP. Прототипы могут обладать различными физическими и механическими свойствами	Трудности при изготовлении сложных геометрических форм (например, основание черепа, клиновидная пазуха, пирамида височной кости). Поверхность прототипа после 3DP имеет шероховатости, слоистость из-за чего необходимо проведение постобработки изделия	Макеты для обучения и предоперационного планирования, хирургические шаблоны, ортезы, стельки, корсеты, матрицы для имплантатов из костнозамещающих материалов
SLA	В точках соприкосновения луча лазера и фотополимера происходит его полимеризация и формирование твердого физического объекта. Луч лазера проходит по поверхности жидкого полимера в соответствии с конфигурацией формируемого слоя. После фотополимеризации предыдущего слоя рабочая платформа погружается в емкость с жидкой смолой на расстояние, соответствующее толщине следующего печатного слоя. Далее процесс печати повторяется. После 3DP изделие промывается с целью удаления неиспользованного в процессе печати материала и при необходимости подвергается постобработке в ультрафиолетовой камере для окончательного затвердевания материала изделия	Фотополимеры	Оборудование: от 200 тыс. до 10 млн руб. Материал: 10–30 тыс. руб./л	Высокая точность 3DP, возможность создания объектов сложной геометрической формы (пирамида височной кости, клиновидная кость, решетчатый лабиринт). Низкий уровень шума в процессе 3DP. Прототипы могут обладать различными физическими и механическими свойствами	Высокая стоимость используемых оборудования и материалов	Макеты для обучения и предоперационного планирования, хирургические шаблоны и направлятели, индивидуальный медицинский инстументарий
SLS	Выборочное спекание мелкодисперсного порошкового (обычно металлического) материала под воздействием управляемого процессором луча, как правило, CO ₂ -лазера	Порошкообразные материалы	Оборудование: 90–200 млн руб. Материал: 70–130 тыс. руб./кг	Возможность создания имплантатов из титанового сплава, керамических материалов	Высокая стоимость оборудования и материалов. Необходимость постобработки с использованием специализированного оборудования	Имплантаты из титанового сплава и керамики

Рис. 1. Индивидуальный титановый имплантат для краниопластики, изготовленный на 3D-принтере SLS [2] (собственные данные).

Fig. 1. An individual titanium implant for cranioplasty manufactured using a 3D SLS printer [2] (Own data).



37]. При краниофациальных повреждениях индивидуальные макеты, напечатанные на 3DP, позволяют нейрохирургу получить более полную информацию о степени имеющегося поражения, спланировать ход вмешательства и более точно ориентироваться во время операции [38, 39]. Широкая доступность программного обеспечения дает возможность врачам принимать непосредственное участие в моделировании имплантатов [40, 41].

В 2013 г. нейрохирурги из США провели операцию по замене костей черепа человеку, пострадавшему в дорожно-транспортном происшествии. Благодаря титановым сетчатым протезам, изготовленным с помощью 3DP, больному удалось заменить около 70% черепа [5].

В 2014 г. С.А. Еолчиан продемонстрировал, что применение индивидуальных имплантатов для краниопластики имеет неоспоримые преимущества по сравнению с традиционными: высокая точность импланта, уменьшение травматичности, сокращение длительности операции и достижение наилучшего косметического результата [42].

В 2015 г. D.J. Vonda и соавт. в своем обзоре указали, что использование индивидуальных имплантатов, полученных с помощью 3DP, представляется очевидной перспективой развития реконструктивной нейрохирургии [43].

В 2020 г. Н.А. Копорушко и соавт. представили опыт проведения краниопластики у 161 пациента. Все больные были поделены на две группы: 80 человек с титановыми пластинами, изготовленными при помощи 3DP (группа 1), и 81 больной с применением стандартных титановых имплантатов (группа 2). В группе 1 в 100% случаев получены отличные косметические результаты, в группе 2 отличный результат получен в 76% случаев, хороший — в 9%,

удовлетворительный — в 8%, неудовлетворительный — в 5% [44].

В настоящее время применение индивидуальных имплантатов регламентировано Программой государственной гарантии оказания высокотехнологичной помощи в разделе «Нейрохирургия»: микрохирургическая реконструкция при врожденных и приобретенных сложных и гигантских дефектах и деформациях свода, лицевого скелета и основания черепа с компьютерным и стереолитографическим моделированием с применением биосовместимых пластических материалов и ресурсоемких имплантатов [31, 45, 46].

Вертебрология

С каждым годом возрастает число пациентов с травмами и заболеваниями позвоночника, которым осуществлено хирургическое лечение с помощью аддитивных технологий 3DP [47–49].

В 2011 г. J. Yang и соавт. сообщили об успешном применении 3DM и направителей для установки транспедикулярных винтов (ТПВ) при проведении корригирующих операций у 20 пациентов с тяжелыми деформациями грудного отдела позвоночника. Авторы исследования отмечают, что высокая точность 3DM позволила добиться хороших и отличных результатов при выполнении инструментальной фиксации. Прецизионность проведения ТПВ подтверждена результатами МСКТ [50].

В 2015 г. M. Yang и соавт. в ретроспективном исследовании оценили результаты оперативного лечения 126 пациентов с подростковым идиопатическим сколиозом Lenke-1 [51]. Все больные были разделены на 2 группы: в 1-й группе ($n=50$) для предоперационного планирования использовались индивидуальные макеты позвоночника, изго-

товленные с помощью 3DP, во 2-й группе ($n=76$) выполнено стандартное предоперационное планирование. По результатам исследования было доказано, что 3DM способствуют сокращению времени операции, кровопотери и объема гемотрансфузии. Статистически достоверной разницы в частоте осложнений, продолжительности пребывания в стационаре, рентгенологических исходах или мальпозиции ТПВ между пациентами исследуемых групп не выявлено.

В 2018 г. А.А. Кулешов и соавт. анонсировали опыт применения 3DP при оперативном лечении деформаций позвоночника [52]. Для 52 пациентов с помощью аддитивных технологий были изготовлены индивидуальные макеты с деформациями позвоночника: с врожденной многоплоскостной деформацией позвоночника ($n=20$), деформацией верхнего отдела шейного отдела позвоночника ($n=12$), со спондилолистезом 3–4-й степени ($n=10$), нейрогенным сколиозом ($n=8$), нейрофиброматозом ($n=2$). 3DM изготавливали в масштабе 1:1 при SLA. Во всех случаях они применялись для предоперационного планирования, включая предполагаемую коррекцию деформации, декомпрессию и фиксацию позвоночника. На основании выполненных 3DM позвоночника в 26 случаях были изготовлены индивидуальные металлоконструкции для коррекции деформации и фиксации соответствующего отдела позвоночника. Во всех случаях применение 3DM позвоночника позволило получить существенную дополнительную информацию как при предоперационном планировании, так и во время операции. Период наблюдения составил 3 года: операции по декомпрессии невральных структур и коррекции деформаций у всех пациентов дали хорошие клинические и рентгенологические результаты. Применение индивидуальных имплантатов позволило достичь стабильной фиксации позвоночника во всех случаях, за исключением трех, в которых пришлось удалить имплантаты из-за инфекционных осложнений ($n=1$) и проблем с заживлением послеоперационной раны ($n=2$).

В 2018 г. А.В. Бурцев и соавт. доказали эффективность методики компьютерного моделирования и 3DP индивидуальных направителей, используемых при фиксации шейного отдела позвоночника. В направителях формировали отверстие диаметром 2,2 мм для сверла. После стерилизации интраоперационно их плотно прикладывали к дужке и остистому отростку позвонка, затем с помощью бора и сверла через направитель формировали от-

верстие, куда и имплантировали ТПВ. На основании отработанной методики провели клиническую апробацию у 3 пациентов. По МСКТ зафиксировано отклонение 1 ТПВ относительно заданной траектории не более чем на 2 мм, при этом мальпозиций не выявлено [53].

В 2018 г. Y. Rap и соавт. выполнили анализ по использованию навигационных лекал ($n=20$, 396 ТПВ) и метода free hand ($n=17$, 312 ТПВ) у подростков с деформациями позвоночника. Время операции и степень коррекции значительно не отличались в группах, а безопасность стабилизации была статистически выше в группе лекал: перфорация 1-й степени наблюдалась в 7,3%, 2-й степени — в 3,3%. В группе free hand перфорация 1-й степени отмечена в 11,9%, 2-й степени — в 11,5%, 3-й степени — в 1,6%; $p=0,000$ [54].

В 2019 г. P.A. Коваленко с соавт. провели анализ безопасности и точности имплантации ТПВ в шейном и грудном отделах позвоночника с использованием индивидуальных лекал различного дизайна [18, 55]. На 3 кадаверах с их применением выполнена имплантация 60 ТПВ в C2–Th4. Используются 3 вида направителей: группа А — односторонние матрицы ($n=20$), группа Б — двусторонние ($n=20$), группа В — двусторонние матрицы с опорой на остистый отросток ($n=20$). Точность и безопасность введения ТПВ оценивали по результатам МСКТ. Направители с трехточечной опорой (группа В) показали самую высокую безопасность имплантации. Средняя девиация ТПВ в точке ввода в группе А составила $5,0\pm 0,5$ мм, в группе Б — $1,7\pm 0,3$ мм, в группе В — $0,35\pm 0,05$ мм. Средняя девиация ТПВ в конечной точке в группе А составила $5,1\pm 0,7$ мм, в группе Б — $3,5\pm 0,6$ мм, в группе В — $0,53\pm 0,05$ мм [18].

В 2020 г. та же группа авторов провела анализ имплантации ТПВ в грудном отделе позвоночника с использованием лекал различных 3DM в сравнении с методикой free hand. В 1-й группе ТПВ в грудном отделе позвоночника были установлены по методике free hand ($n=23$, 112 ТПВ). Во 2-й группе ($n=11$, 42 ТПВ) установка осуществлялась с помощью билатеральных одноуровневых лекал, в 3-й группе ($n=13$, 54 ТПВ) — с помощью билатеральных одноуровневых лекал с опорой на остистый отросток. В группе 1 нулевая степень безопасности зарегистрирована в 67% случаев, степень 1 — в 18,8%, степень 2 — в 9,8%, степень 3 — в 4,5%. В группе 2 нулевая степень безопасности зарегистрирована в 85,71% случаев, степень 1 — в 14,29%; в группе

3 — в 90,74 и 9,26% соответственно. Случаев перфорации кости более чем на половину диаметра ТПВ в группах 2 и 3 не было. Применение индивидуальных лекал для имплантации ТПВ в грудном отделе позвоночника представляется более безопасным методом по сравнению с free hand [56].

Применение аддитивных технологий нашло свое применение также в изготовлении индивидуальных имплантатов, позволяющих производить корригирующие операции на позвоночнике без применения остеотомий. Альтернативой для коррекции сагиттального и фронтального баланса в позвоночнике является использование индивидуальных лордозирующих кейджей, изготавливаемых при помощи 3DP (рис. 2) [57].

Считается, что в коррекции сагиттального баланса восстановление сегментарного лордоза является одной из основных целей вмешательства. Современные лордозирующие кейджи, используемые для ALIF, LLIF, позволяют скорректировать сегментарный лордоз в среднем до 20°. Их можно устанавливать через вентральный минимально инвазивный доступ (рис. 3), что дает возможность осуществлять сопоставимый объем оперативного вмешательства, как и при задних открытых методиках с применением вертебротомий и инструментальной фиксации позвоночника.

В 2020 г. А.А. Денисов и соавт. подтвердили, что применение лордозирующих кейджей с углами 20–30° значительно увеличивают сегментарный лордоз и лордоз поясничного отдела позвоночника (рис. 4) [57].

В 30 случаях были имплантированы кейджи с индивидуальным, заранее запланированным углом лордоза. Степень полученной коррекции сегментарного лордоза практически была идентична прогнозируемым результатам для группы ALIF. Ав-

Рис. 2. Индивидуальные кейджи для ALIF, изготовленные при помощи 3DP (собственные данные).

Fig. 2. Individual cages for ALIF manufactured using 3DP (Own data).

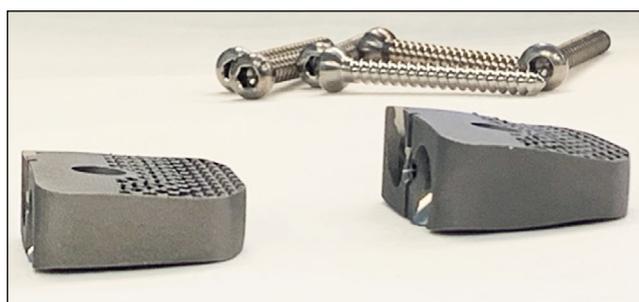


Рис. 3. Установка индивидуального кейжда (собственные данные).

Fig. 3. Installation of an individual cage (Own data).

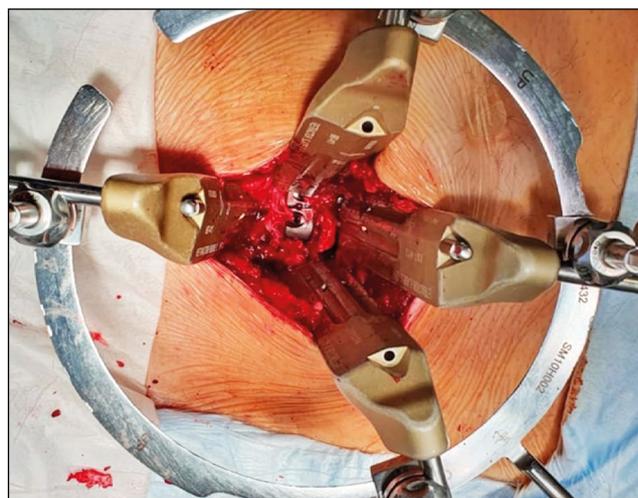
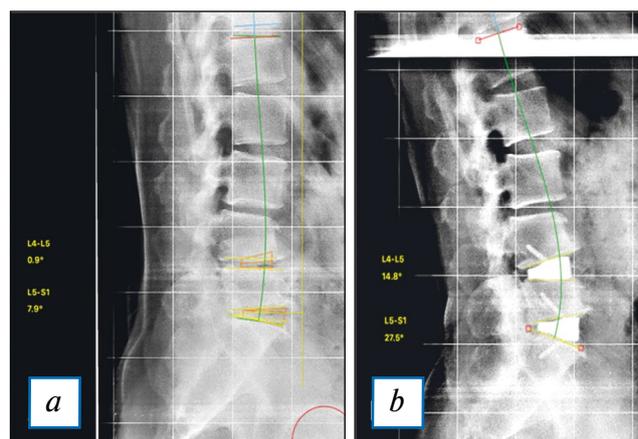


Рис. 4. Измерение сегментарного и лордоза поясничного отдела позвоночника.

Fig. 4. Measurement of segmental lumbar lordosis.



Примечание. *a* — рентгенограмма пациента до операции (слева представлены значения углов L5–S1 = 7,9, L4–L5 = 0,9); *b* — рентгенограмма того же пациента после установки индивидуальных межтеловых имплантатов (значения полученных углов сегментарного лордоза: L5–S1 = 27,5; L4–L5 = 14,8) (данные А.А. Денисова).

Note. *a* — a radiograph of a patient before the surgery (on the left, the angles L5–S1=7.9, L4–L5=0.9 are displayed); *b* — a radiograph of the same patient after installation of individual intervertebral implants (the angles of segmental lordosis are L5–S1=27.5, L4–L5=14.8). (Own data of A.A. Denisov).

торы связывают полученные результаты как с техникой установки имплантатов, которая в случае использования вентрального доступа требует полного освобождения передней продольной связки, так с наличием конструктивных преимуществ используемого имплантата (форма клина).

Рис. 5. Этап моделирования операции на физическом прототипе голеностопного сустава и стопы пациента (данные Р.О. Горбатова).

Fig. 5. The stage of modeling the surgery using a physical prototype of the patient's ankle joint and foot (Data of Gorbатов R.O.)



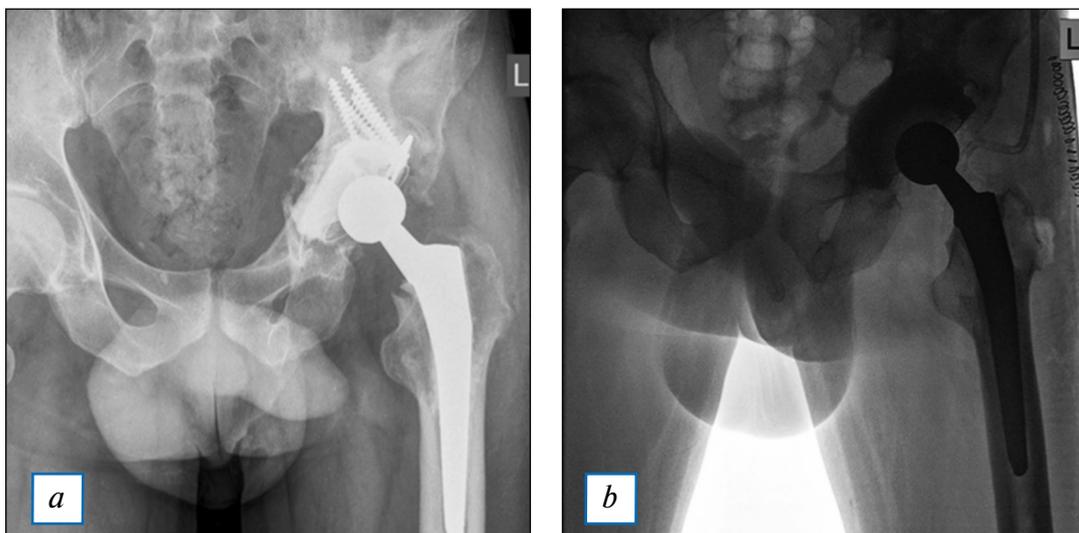
Травматология и ортопедия

В травматологии и ортопедии наиболее часто 3DP применяются при создании индивидуальных экзопротезов, ортезов, позволяющих заменить гипсовую повязку, индивидуальных стелек, хирургических шаблонов для остеотомий или резекций, высокоточных 3DM для предоперационного планирования, которые позволяют выполнить моделирование операции еще на предоперационном этапе, подобрать необходимые металлоконструкции, выполнить их персонификацию [58] (рис. 5).

С помощью 3DP в травматологии и ортопедии создаются индивидуальные имплантаты из титана и костнозамещающего материала, благодаря которым появилась возможность замещения любых по форме, сложности и размерам костных дефектов. Для их создания необходимы только данные МСКТ-обследования пациента [2, 14]. Одним из перспективных направлений использования аддитивных технологий 3DP является создание гибридных эндопротезов, включающих титановый и костнозамещающий компоненты (рис. 6). Кроме синтетических материалов в качестве костнозамещающего вещества возможно использовать алло- и аутокость. В настоящее время уже разработаны технологии изготовления гибридных эндопротезов тазобедренного, коленного, плечевого и лучезапястного суставов [22, 59]. Проведенные исследования статистически достоверно доказали их эффективность, в том числе при лечении пациентов с перипротезной инфекцией. По данным оценки клинико-рентгенологических послеоперационных результатов не выявлено ни одного случая рецидива периимплантной инфекции, а также развития неинфекционных осложнений, включая вывихи, миграцию компонентов эндопротеза, переломы костнозамещающего компонента имплантата. После операции полностью отказались от приема обезболивающих препаратов 73% ($n=11$) пациентов. Все больные после эндопротезирования тазобедренного и коленного суставов могли передви-

Рис. 6. Рентгенограмма таза: *a* — септическая нестабильность эндопротеза левого тазобедренного сустава, *b* — рентгенограмма после ревизионного эндопротезирования с имплантацией индивидуального спейсера, изготовленного с помощью 3DP (данные Р.О. Горбатова).

Fig. 6. Pelvic radiographs: *a* — Septic instability of an endoprosthesis of the left hip joint; *b* — Same patient, revision endoprosthesis with implantation of an individual spacer fabricated using 3DP (Data of Gorbатов R.O.).



гаться с помощью костылей с частичной опорой на оперированную конечность. У всех пациентов после ревизионного эндопротезирования плечевого сустава сохранились движения в нем. Использование индивидуальных гибридных эндопротезов в ревизионном эндопротезировании крупных суставов позволило не только купировать инфекционный процесс, сохранить функцию опоры и передвижения, артикуляцию, но и прецизионно заместить дефекты костной ткани [59].

ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОХИРУРГОВ, ТРАВМАТОЛОГОВ И ОРТОПЕДОВ

Необходимость постоянной отработки мануальных навыков является ключевым разделом обучения в хирургии [27, 60]. В особенности важны данные вопросы в нейрохирургии, травматологии и ортопедии, где нужно не только непрерывное совершенствование и оттачивание мануальных навыков, но и постоянное закрепления знаний по нормальной и патологической анатомии, топографии и др. [8, 27, 61]. Отработка мануальных навыков позволяет придать уверенность врачу в условиях высокого стресса и отточить движения. В настоящее время в РФ введен проект о непрерывном образовании медицинских и фармацевтических работников, что активизирует специалистов к участию в различных конференциях, мастер-классах, кадавер-курсах, школах и семинарах [62]. В рамках данных мероприятий зачастую проводятся курсы по совершенствованию мануальных навыков, где они оттачиваются на муляжах, препаратах и 3DM [7, 13, 63]. Стандартом для обучения являются занятия на кадаверном материале, но данный вид обучения дорогостоящий, требует наличия специальных условий для проведения обучающего процесса. Следовательно, применение муляжей и био-моделей, максимально приближенных к реальным, представляется крайне востребованным [11]. 3DP позволяет изготавливать прототипы с высокой точностью соответствия анатомическим объектам [13, 60, 64]. Кроме того, они обеспечивают прецизионную симуляцию большинства характеристик костной ткани для достижения максимально реалистичных ощущений хирурга при работе с инструментарием, а также во избежание разрушения и деформации изделия при выполнении пропила [13]. FDM дает возможность создавать макеты для отработки навыков краниотомии [65, 66]. В спинальной нейрохирургии симуляционные прототипы также нашли широкое применение [13, 67, 68]: они

используются для отработки доступов к спинному мозгу и телам позвонков, а также при других оперативных вмешательствах — стабилизации позвоночника, вертебропластики [64]. Кроме того, 3DP позволяет оттачивать навыки в хирургии деформаций опорно-двигательного аппарата, что трудно выполнить на кадаверных материалах. Таким образом, динамично развивающиеся современные технологии 3DP все глубже внедряются в нейрохирургию, травматологию и ортопедию, обеспечивая возможность качественного освоения мануальных навыков и улучшения результатов проводимых хирургических вмешательств [27, 69].

ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ МЕДИЦИНСКОЙ 3DP В РОССИИ

В настоящий момент использование индивидуальных медицинских изделий регулируется пунктом 5 статьи 38 Федерального закона от 21.11.2011 № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» где определено, что медицинские изделия, изготовленные по индивидуальным заказам пациентов, к которым предъявляются специальные требования по назначению медицинских работников и которые предназначены исключительно для личного использования конкретным пациентом, государственной регистрации не подлежат. Это подтверждается также Постановлением Правительства РФ от 27.12.2012 № 1416 «Об утверждении Правил государственной регистрации медицинских изделий» и Письмом Федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения от 21.07.2015 № 04-21338/15. Таким образом, индивидуальные медицинские изделия, изготовленные с использованием 3DP по антропометрическим показателям определенных пациентов, не подлежат государственной регистрации, однако государственной регистрации подлежит материал, из которого они изготавливаются [3].

Собственный опыт

В клинической работе нейрохирургической клиники ФБУЗ «Приволжский окружной медицинский центр» ФМБА России (Нижний Новгород) активно применяются аддитивные технологии (FDM 3D-принтер). При проведении краниопластики изготавливается 3DM утраченного участка черепа пациента, по которой в дальнейшем моделируется трансплантат, что, по нашему опыту, позволяет сократить время операции, добиться отличных косметических результатов. Мы считаем, что ис-

пользование 3DP является обязательным при реконструкции костных дефектов большой площади, сложной геометрической формы и локализации (рис. 7).

3DP применяется в хирургии деформаций позвоночника. Изготовление индивидуальных прототипов позвоночника позволяет спланировать оперативное лечение, предоставляет тактильную информацию и возможность определения оптимальных траекторий введения ТПВ (рис. 8).

3DM, созданные на 3DP, позволяют нейрохирургу рассказать пациенту подробно о его заболевании и подходах к его лечению, что улучшает коммуникацию между пациентом и врачом. Некоторые исследования показали, что использование 3DM во время сеансов общения врача и пациента может увеличить согласие пациента и его удовлетворенность по сравнению с использованием традиционных 2D-изображений [70, 71]. Несомненно, 3DP значительно упрощает работу нейрохирургов в операционной, позволяя заранее в полной мере планировать все этапы вмешательства. На наш

Рис. 7. 3DM черепа, напечатанная на 3D FDM-принтере, для планирования краниопластики. Белым цветом напечатана область гигантского сложного посттрепанационного костного дефекта, по которому изготавливался индивидуальный титановый имплантат (фото А.В. Ярикова).

Fig. 7. 3DM of the cranium printed with the use of a 3D FDM printer for the design of cranioplasty. The region of a giant complicated post-trepanation bone defect which is to be repaired with the fabricated titanium implant, is displayed in white color (Photo by Yarikov A.V.).



Рис. 8. Биомодель позвоночника при сложном сколиозе (фото А.В. Ярикова).

Fig. 8. A biomodel of the spine with complex scoliosis (Photo by Yarikov A.V.).

взгляд, оптимизация рабочего времени нейрохирургов и качество получаемых изделий являются приоритетными задачами, и в то же время цена индивидуальных изделий может быть снижена не за счет перекладывания задач 3D-моделирования на нейрохирургов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С каждым годом аддитивные технологии 3DP все шире внедряются в практическое здравоохранение. Увеличивается количество разработанных технологий, оборудования и материалов для медицинской 3DP. Ежегодно возрастает число пролеченных пациентов с использованием аддитивных технологий. Медицинская 3DP уже сейчас используется в нейрохирургии, травматологии и ортопедии для создания ортезов, стелек, корсетов, макетов для обучения и предоперационного планирования, индивидуальных имплантатов и инструментария для их установки, персонифицированных направителей и др. Аддитивные технологии становятся одним из основных инструментов персонифицированной медицины.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Участие авторов. А.В. Яриков — написание статьи, лечение пациентов; Р.О. Горбатов — написание статьи, обзор публикаций по теме статьи; А.А. Денисов — написание статьи, лечение пациентов; И.И. Смирнов — обзор публикаций по теме статьи; А.Г. Соснин — лечение пациентов; О.А. Перльмуттер — редактирование статьи; А.П. Фраерман — редактирование статьи, концепция и дизайн ра-

боты; А.А. Калинин — редактирование статьи, утверждение окончательной версии для публикации. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Authors contribution. A.V. Yarikov — manuscript writing, treatment of patients; R.O. Gorbatov — manuscript writing, literature analysis; A.A. Denisov — manuscript writing, treatment of patients; Smirnov I.I. — literature analysis; Sosnin A.G. — treatment of patients; O.A. Perlmutter — manuscript editing; A.P. Fraerman — manuscript editing, concept and design of the study; A.A. Kalinkin — manuscript editing, approval of the final version for publication. The authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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

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

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

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Кравчук А.Д., Маряхин А.Д., Охлопков В.А., и др. Аддитивные технологии в реконструктивной хирургии дефектов черепа / 3D-технологии в медицине: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Нижний Новгород, 2019. С. 24–25. [Kravchuk AD, Maragin AD, Okhlopov VA, et al. Additive technology in reconstructive surgery of skull defects. 3D-technologies in medicine proceedings of the IV all-Russian scientific-practical conference. Nizhny Novgorod; 2019. P. 24–25. (In Russ).]
2. Николаенко С.А., Халапян А.А., Федоров Ю.В., Шапиро Л.А. Реконструкция обширного челюстно-лицевого дефекта с применением эпитеза на магнитной фиксации. Клинический случай // *Клиническая стоматология*. 2019. № 1. С. 63–65. [Nikolaenko SA, Calapan AA, Fedorov YuV, Shapiro LA. Reconstruction of extensive maxillofacial defect with the use of epitheta on magnetic fixing. Clinical case. *Clinical dentistry*. 2019;(1):63–65. (In Russ).]
3. Холодильов А.А., Яковлева А.В. Применение аддитивных технологий в социальной адаптации слабовидящих людей // *Современные научные исследования и разработки*. 2019. № 1. С. 1085–1089. [Kholodilov AA, Yakovleva AV. Application of additive technologies in the social adaptation of visually impaired

people. *Modern scientific research and development*. 2019;(1):1085–1089. (In Russ).]

4. Сафонов М.Г., Строгий В.В. Применение 3D-печати в медицине // *Международный студенческий научный вестник*. 2015. № 3-3. С. 394–395. [Safonov MG, Stern VV. Application of 3D printing in medicine. *International student scientific bulletin*. 2015;(3-3):394–395. (In Russ).]

5. Холодильов А.А., Яковлева А.В. Инновационное применение аддитивных технологий в медицине // *Молодой ученый*. 2019. № 5. С. 35–38. [Holodilov AA, Yakovlev VA. Innovative application of additive technologies in medicine. *Young scientist*. 2019;(5):35–38. (In Russ).]

6. Холодильов А.А., Фалеева Е.В., Холодилова М.В. Анализ технологии перевода трехмерной модели из CAD-формата в управляющий код при 3D-печати // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. 2020. № 2. С. 296–301. [Kholodilov AA, Faleeva EV, Kholodilova MV. Analysis of the technology of translating a three-dimensional model from CAD-format into a control code for 3D printing. *Scientific-technical and economic cooperation of the APR countries in the XXI century*. 2020;(2):296–301. (In Russ).]

7. Приходько А.А., Виноградов К.А., Вахрушев С.Г. Меры по развитию медицинских аддитивных технологий в Российской Федерации // *Медицинские технологии. Оценка и выбор*. 2019. № 2. С. 10–15. [Prikhodko AA, Vinogradov KA, Vakhrushev SG. Measures for the development of medical additive technologies in the Russian Federation. *Medical technologies. Evaluation and selection*. 2019;(2):10–15. (In Russ).]

8. Коваленко Р.А., Пташников Д.А., Черebilло В.Ю., и др. Применение индивидуальных 3D моделей в хирургии позвоночника: обзор литературы и первый опыт использования // *Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова*. 2018. Т. 10, № 3-4. С. 43–48. [Kovalenko RA, Ptashnikov DA, Cherebillo VYu, et al. Application of individual 3D models in spine surgery-literature review and first use experience. *Russian Neurosurgical Journal named after Professor A.L. Polenov*. 2018;10(3-4):43–48. (In Russ).]

9. Холодильов А.А., Пузынина М.В. Обзор программ-слийсеров для послойного деления 3D-моделей и возможности расширения их функционала / Труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием: сб. «Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» под ред. С.А. Кудрявцева. Хабаровск, 2018. С. 91–94. [Kholodilov AA, Puzynina MV. Review of slicer programs for layer-by-layer division of 3D models and the possibility of expanding their functionality. In the collection: *Scientific-technical and socio-economic cooperation of the APR countries in the XXI centur. Proceedings of the All-Russian scientific-practical Conference of Creative Youth with international participation*. Ed. by S.A. Kudryavtsev. Khabarovsk; 2018. P. 91–94. (In Russ).]

10. Лялюцкая М.Ю. Анализ рынка 3D-печати в Красноярске // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2017. Т. 3, № 13. С. 54–56. [Lyalutskaya MYu. Analysis of the 3D printing market in Krasnoyarsk. *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2017;3(13):54–56. (In Russ).]

11. Иванов В.П., Ким А.В., Хачатрян В.А. 3D-печать в краниофациальной хирургии и нейрохирургии. Опыт ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» // *Нейрохирургия и неврология детского возраста*. 2018. № 3. С. 28–39. [Ivanov VP, Kim AV, Khachatryan VA. 3D printing in craniofacial surgery and neurosurgery. Experience of the Federal State Budgetary Institution «Almazov NMIC». *Neurosurgery and neurology of childhood*. 2018;(3):28–39. (In Russ).]

12. Семенов В.В., Верхозина Ю.А. 3D-принтеры — основа нашего будущего // *Молодежный вестник ИрГТУ*. 2017. № 4. С. 1. [Semenov VV, Verhozina YuA. 3D-printers—the basis of our future. *Molodezhny vestnik IrGTU*. 2017;(4):1. (In Russ).]

13. Кравчук А.Д., Маряхин А.Д., Потапов А.А., и др. Применение аддитивных технологий в нейрохирургии / Материали V международной конференции: в сб. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее». Москва, 2019. С. 253–274. [Kravchuk AD,

Maryakhin AD, Potapov AA, et al. Application of additive technologies in neurosurgery. In the collection: Additive technologies: present and future Proceedings of the V International Conference. Moscow; 2019. P. 253–274. (In Russ.)]

14. Карякин Н.Н., Горбатов Р.О., Новиков А.Е., Нифтуллаев Р.М. Хирургическое лечение пациентов с опухолями длинных трубчатых костей верхних конечностей с использованием индивидуальных имплантатов из костнозамещающего материала, созданных по технологиям 3D-печати // *Гений ортопедии*. 2017. Т. 23, № 3. С. 323–330. [Karyakin NN, Gorbatov RO, Novikov AE, Niftullaev RM. Surgical treatment of patients with tumors of the long tubular bones of the upper extremities using individual implants made of bone-substituting material created using 3D printing technologies. *Genij Ortopedii*. 2017;23(3):323–330. (In Russ.)]

15. Нестеренко Т.С. Полимеры и 3D-печать в ортопедии / Сб. статей Международной научно-практической конференции «Интеллектуальный и научный потенциал XXI века». Волгоград, 2017. С. 111–116. [Nesterenko TS. Polymers and 3D printing in orthopedics. In the collection: Intellectual and scientific potential of the XXI century. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference: in 4 parts. Volgograd; 2017. P. 111–116. (In Russ.)]

16. Лялюцкая М.Ю. Формирование кластера аддитивных технологий в регионе. В сб. Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие как фактор конкурентоспособности национальных экономик». Стерлитамак, 2018. С. 73–79. [Lyalutskaia MYu. Formation of a cluster of additive technologies in the region. In the collection: Innovative development as a factor of competitiveness of national economies. Collection of articles on the results. International Scientific and practical Conference. Sterlitamak; 2018. P. 73–79. (In Russ.)]

17. Черebilло С.А., Евсеев А.В., Ипполитов Е.В., и др. Пластика дефектов черепа с использованием трехмерного моделирования и лазерной стереолитографии // *Перспективные материалы*. 2011. № S13. С. 917–922. [Cherebillo SA, Evseev AV, Ippolitov EV, et al. Plastic skull defects using three-dimensional modeling and laser stereolithography. *Perspective materials*. 2011;(S13):917–922. (In Russ.)]

18. Коваленко Р.А., Кашин В.А., Черebilло В.Ю., и др. Определение оптимального дизайна навигационных матриц для транспедикулярной имплантации в шейном и грудном отделах позвоночника: результаты кадавер-исследования // *Хирургия позвоночника*. 2019. Т. 16, № 4. С. 77–83. [Kovalenko RA, Kashin VA, Cherebillo VYu, et al. Determining the optimal design of navigation matrices for transpedicular implantation in the cervical and thoracic spine: results of cadaver research. *Spinal surgery*. 2019;16(4):77–83. (In Russ.)]

19. Потапов А.А., Корниенко В.Н., Кравчук А.Д., и др. Современные технологии в хирургическом лечении последствий травмы черепа и головного мозга // *Вестник Российской академии медицинских наук*. 2012. Т. 67. № 9. С. 31–38. [Potapov AA, Kornienko VN, Kravchuk AD, et al. Modern technologies in the surgical treatment of injuries of the skull and brain. *Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2012;67(9):31–38. (In Russ.)]

20. Внук В.В., Ипполитов Е.В., Новиков М.М., Чербыло С.А. Применение систем автоматизированного проектирования и аддитивных технологий в восстановительной хирургии // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон». 2019. № 29. С. 176–180. [Vnuk VV, Ippolitov EV, Novikov MM, Cerebelo SA. Application of computer-aided design and additive technology in reconstructive surgery. *Proceedings of the International conference on computer graphics and vision "GraphiCon"*. 2019;(29):176–180. (In Russ.)]

21. Николаенко А.Н. Применение 3D-моделирования и трехмерной печати в хирургии (обзор литературы) // *Medline.ru. Российский биомедицинский журнал*. 2018. Т. 19, № 1. С. 20–44. [Nikolaenko AN. Application of 3D modeling and three-dimensional printing in surgery (literature review). *Medline.ru. Russian Biomedical Journal*. 2018;19(1):20–44. (In Russ.)]

22. Мишинов С.В., Ступак В.В., Копорушко Н.А. Краниопластика: обзор методик и новые технологии в создании имплан-

татов. современное состояние проблемы // *Политравма*. 2018. № 4. С. 82–89. [Mishinov SV, Stupak VV, Koporuszko NA. Cranioplasty: review of methods and new technologies in the creation of implants, the current state of the problem. *Polytrauma*. 2018;(4):82–89. (In Russ.)]

23. Сушенцов Е.А., Мусаев Э.Р., Софронов Д.И., и др. Компьютерные технологии и 3D-принтинг в лечении больных с опухолями костей таза // *Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи*. 2018. № 1. С. 29–32. [Sushentsov EA, Musaev ER, Sofronov DI, et al. Computer technologies and 3D-printing in the treatment of patients with pelvic bone tumors. *Sarcoma of bones, soft tissues and skin tumors*. 2018;(1):29–32. (In Russ.)]

24. Мишинов С.В., Ступак В.В., Копорушко Н.А., и др. Реконструктивные нейрохирургические вмешательства с использованием индивидуальных титановых имплантатов // *Медицинская техника*. 2018. № 3. С. 5–7. [Mishinov SV, Stupak VV, Koporuszko NA, et al. Reconstructive neurosurgical intervention, using a titanium implants. *Medical equipment*. 2018;(3):5–7. (In Russ.)]

25. Малаев И.А., Пивовар М.Л. Аддитивные технологии: применение в медицине и фармации // *Вестник фармации*. 2019. № 2. С. 98–107. [Malaev IA, Pivovar ML. Additive technologies: application in medicine and pharmacy. *Bulletin of Pharmacy*. 2019;(2):98–107. (In Russ.)]

26. Левченко О.В. Современные методы краниопластики // *Нейрохирургия*. 2010. № 2. С. 5–13. [Levchenko OV. Modern methods of cranioplasty. *Neurosurgery*. 2010;(2):5–13. (In Russ.)]

27. Мишинов С.В., Ступак В.В., Мамуладзе Т.З., и др. Использование трехмерного моделирования и трехмерной печати в обучении нейрохирургов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. Т. 11, № 6. С. 1063–1067. [Mishinov SV, Stupak VV, Mamuladze TZ, et al. The Use of three-dimensional modeling and three-dimensional printing in the training of neurosurgeons. *International journal of applied and fundamental research*. 2016;11(6):1063–1067. (In Russ.)]

28. Мишинов С.В., Ступак В.В., Панченко А.А., Красовский И.Б. Реконструкция лобно-скуло-орбитальной зоны с использованием индивидуального титанового имплантата, созданного методом прямого лазерного спекания на 3D-принтере. Клинический случай // *Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова*. 2017. Т. 9, № 1. С. 80–82. [Mishinov SV, Stupak VV, Panchenko AA, Krasovsky IB. Reconstruction of the frontal-zygomatic-orbital zone using an individual titanium implant created by direct laser sintering on a 3D printer. Clinical case. *Russian Neurosurgical Journal named after Professor A.L. Polenov*. 2017;9(1):80–82. (In Russ.)]

29. Иванов О.В., Семичев Е.В., Шнякин П.Г., Собакарь Е.Г. Пластика дефектов черепа: от аутокости к современным биоматериалам (обзор литературы) // *Медицинская наука и образование Урала*. 2018. Т. 19, № 3. С. 143–149. [Ivanov OV, Semichev EV, Shnyakin PG, Sobakar EG. Plastique of skull defects: from autokost to modern biomaterials (literature review). *Meditsinskaya nauka i obrazovanie Ural*. 2018;19(3):143–149. (In Russ.)]

30. Копорушко Н.А., Мишинов С.В., Ступак В.В. Клинические результаты реконструктивных нейрохирургических вмешательств на черепе с использованием компьютерного моделирования и трехмерной печати // *Политравма*. 2020. № 3. С. 54–64. [Koporuszko NA, Mishinov SV, Stupak VV. Clinical results of reconstructive neurosurgical interventions on the skull using computer modeling and three-dimensional printing. *Polytrauma*. 2020;(3):54–64. (In Russ.)]

31. Ступак В.В., Копорушко Н.А., Мишинов С.В., и др. Эпидемиологические данные приобретенных дефектов черепа у больных, перенесших черепно-мозговую травму, на примере крупного промышленного города (Новосибирска) // *Политравма*. 2019. № 1. С. 6–10. [Stupak VV, Koporuszko NA, Mishinov SV, et al. Epidemiological data acquired defects of the skull in patients with traumatic brain injury, for example, a large industrial city (Novosibirsk). *Polytrauma*. 2019;(1):6–10. (In Russ.)]

32. Гаيبов С.С., Воробьев Д.П., Захарчук Е.В. Пластика сложного гигантского дефекта черепа (клинический случай) // *Университетская медицина Урала*. 2018. Т. 4, № 3.

С. 7–9. [Gaibov SS, Vorob'ev DP, Zakharchuk IA, Zakharchuk EV. Plastika slozhnogo gigantic defect of the skull (clinical case). *Universitetskaya medicina Ural*. 2018;4(3):7–9. (In Russ).]

33. Иванов А.Л., Сатанин Л.А., Агапов П.И., и др. Компьютерное планирование и биомоделирование в лечении пациента со сложным посттравматическим дефектом и деформацией краниофациальной области (клиническое наблюдение) // *Нейрохирургия и неврология детского возраста*. 2012. № 2-3. С. 144–151. [Ivanov AL, Satanin LA, Agapov PI, et al. Computer-aided planning and biodelivery in the treatment of patients with complex post-traumatic defect and deformity of the craniofacial region (clinical observation). *Neurosurgery and neurology of children's age*. 2012;(2-3):144–151. (In Russ).]

34. Ступак В.В., Мишинов С.В., Садовой М.А., и др. Современные материалы, используемые для закрытия дефектов костей черепа // *Современные проблемы науки и образования*. 2017. № 4. С. 38. [Stupak VV, Mishinov SV, Sadovoy MA, et al. Modern materials used for closing defects of the skull bones. *Modern problems of science and education*. 2017;(4):38. (In Russ).]

35. Офицеров А.А., Боровкова Н.В., Талыпов А.Э., Пономарев И.Н. Современные материалы для реконструкции костей свода черепа // *Трансплантология*. 2019. Т. 11, № 3. С. 234–243. [Ofitserov AA, Borovkova NV, Talypov AE, Ponomarev IN. Modern materials for the reconstruction of the bones of the skull arch. *Transplantologiya*. 2019;11(3):234–243. (In Russ).]

36. Иванов О.В., Семичев Е.В., Собакарь Е.Г., и др. Опыт пластики дефектов черепа титановыми сетчатыми имплантатами в Сибирском научно-клиническом центре ФМБА России. В сб.: *Актуальные вопросы современной хирургии*. Красноярск, 2018. С. 285–289. [Ivanov OV, Semichev EV, Sobakar EG, et al. Experience of plastic surgery of skull defects with titanium mesh implants in the Siberian Scientific and Clinical Center of the FMBA of Russia. In the collection: *Actual issues of modern surgery*. Krasnoyarsk; 2018. P. 285–289. (In Russ).]

37. Иванов О.В., Семичев Е.В., Собакарь Е.Е., и др. Опыт пластики обширных дефектов черепа титановыми имплантатами. В сб. статей научно-практической конференции «Современные технологии лечения пациентов с травмой опорно-двигательного аппарата и центральной нервной системы». Красноярск, 2019. С. 97–102. [Ivanov OV, Semichev EV, Sobakar EE, et al. Experience of plastic surgery of extensive skull defects with titanium implants. In the collection: *Modern technologies of treatment of patients with injuries of the musculoskeletal system and the central nervous system*. Krasnoyarsk; 2019. P. 97–102. (In Russ).]

38. Михайлюков В.М., Давыдов Д.В., Левченко О.В. Посттравматические дефекты и деформации глазницы. Особенности диагностики и принципы лечения (обзор литературы) // *Голова и шея*. 2013. № 2. С. 40–48. [Mikhailyukov VM, Davydov DV, Levchenko OV. Posttraumatic defects and deformities of the eye socket. Features of diagnosis and principles of treatment (literature review). *Head and Neck*. 2013;(2):40–48. (In Russ).]

39. Мишинов С.В., Ступак В.В., Копорущко Н.А., и др. Применение индивидуальных титановых имплантатов, полученных методом трехмерной печати. В сб.: *Второй Сибирский нейрохирургический конгресс*. Новосибирск, 2018. С. 82. [Mishinov SV, Stupak VV, Koporushko NA, et al. The use of individual titanium implants obtained by the method of three-dimensional printing. In: *The Second Siberian Neurosurgical Congress. Collection of abstracts*. Novosibirsk; 2018. P. 82. (In Russ).]

40. Левченко О.В., Шалумов А.З., Крылов В.В. Пластика дефектов лобно-глазничной локализации с использованием безрамной навигации // *Нейрохирургия*. 2010. № 3. С. 30–35. [Levchenko OV, Shalumov AZ, Krylov VV. Plasty of defects of frontal-orbital localization with the use of frameless navigation. *Neurosurgery*. 2010;(3):30–35. (In Russ).]

41. Копорущко Н.А., Ступак В.В., Мишинов С.В., Вардосанидзе В.К. Этиология и эпидемиология пациентов с приобретенными дефектами костей черепа в Новосибирске / *Цивьяновские чтения: материалы XI Всероссийской научно-практической*

конференции с международным участием. Новосибирск, 2019. С. 108–110. [Koporushko NA, Stupak VV, Mishinov SV, Vardosandze VK. Etiology and epidemiology of patients with acquired defects of the skull bones in Novosibirsk. *Materials of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation*. Novosibirsk; 2019. P. 108–110. (In Russ).]

42. Еолчиан С.А. Пластика сложных дефектов черепа имплантатами из титана и полиэфирэтеркетона (РЕЕК), изготовленными по CAD/CAM технологиям // *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко*. 2014. Т. 78, № 4. С. 3–13. [Eolchian SA. Plastic surgery of complex skull defects with implants made of titanium and polyetheretherketone (REEK), made using CAD/CAM technologies. *Questions of neurosurgery named after N.N. Burdenko*. 2014;78(4):3–13. (In Russ).]

43. Bonda DJ, Manjila S, Selman WR, Dean D. The Recent Revolution in the Design and Manufacture of Cranial Implants: Modern Advancements and Future Directions. *Neurosurgery*. 2015;77(5):814–824. doi: 10.1227/NEU.0000000000000899

44. Копорущко Н.А., Мишинов С.В., Кангельдиев А.Э., Ступак В.В. Косметические результаты реконструктивных нейрохирургических вмешательств на черепе // *Политравма*. 2020. № 1. С. 47–55. [Koporushko NA, Mishinov SV, Kangelidiev AE, Stupak VV. Cosmetic results of reconstructive neurosurgical interventions on the skull. *Polytrauma*. 2020;(1):47–55. (In Russ).]

45. Копорущко Н.А., Ступак В.В., Мишинов С.В., и др. Этиология и эпидемиология приобретенных дефектов костей черепа, полученных при различной патологии центральной нервной системы, и число больных, нуждающихся в их закрытии, на примере крупного промышленного города // *Современные проблемы науки и образования*. 2019. № 2. С. 120. [Koporushko NA, Stupak VV, Mishinov SV, et al. Etiology and epidemiology of acquired defects of the skull bones obtained in various pathologies of the central nervous system, and the number of patients who need their closure, on the example of a large industrial city. *Modern problems of science and education*. 2019;(2):120. (In Russ).]

46. Копорущко Н.А., Ступак В.В., Мишинов С.В., и др. Эпидемиология и этиология приобретенных дефектов костей черепа на примере крупного промышленного города // *Русский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова*. 2019. Т. 11, № S. С. 209–210. [Koporushko NA, Stupak VV, Mishinov SV, et al. Epidemiology and pidemiology and etiology of acquired skull bone defects on the example of a large industrial city. *Russian Neurosurgical Journal named after Professor A.L. Polenov*. 2019;11(S):209–210. (In Russ).]

47. Бурцев А.В., Губин А.В., Рябых С.О., Сергиенко О.М. Применение 3D-моделирования и печати при задней стабилизации шейного отдела позвоночника винтовыми конструкциями / *3D-технологии в медицине: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции*. Нижний Новгород, 2019. С. 10–11. [Burtsev AV, Gubin AV, Ryabykh SO, Sergienko OM. Application of 3D-modeling and printing in the posterior stabilization of the cervical spine with screw structures. *3D-technologies in medicine: Materials of the IV All-Russian Scientific and practical conference*. Nizhny Novgorod; 2019. P. 10–11. (In Russ).]

48. Коваленко Р.А., Кашин В.А., Черebilло В.Ю., Руденко В.В. Индивидуальные 3D-модели позвоночника как инструмент периоперационного планирования при травмах шейного отдела позвоночника. В сб. тезисов Пятого юбилейного конгресса с международным участием «Перспективы импортозамещения в России». Санкт-Петербург, 2020. С. 119–120. [Kovalenko RA, Kashin VA, Cherebillo VYu, Rudenko VV. Individual 3D models of the spine as a tool for perioperative planning in injuries of the cervical spine. In the book: *Medical care for injuries. New in organization and technology. Prospects for import substitution in Russia Collection of abstracts of the Fifth Anniversary Congress with international participation*. Saint Petersburg; 2020. P. 119–120. (In Russ).]

49. Коваленко Р.А., Руденко В.В., Кашин В.А., и др. Применение индивидуальных 3D-навигационных матриц для транс-

педикулярной фиксации субаксиальных шейных и верхнегрудных позвонков // *Хирургия позвоночника*. 2019. Т. 16, № 2. С. 35–41. [Kovalenko RA, Rudenko VV, Kashin VA, et al. Application of individual 3D-navigation matrices for transpedicular fixation of subaxial cervical and upper thoracic vertebrae. *Spine Surgery*. 2019;16(2):35–41. (In Russ).]

50. Yang JC, Xiang Yang Ma XY, Lin J, et al. Personalised modified osteotomy using computer-aided design-rapid prototyping to correct thoracic deformities. *Int Orthop*. 2011;35(12):1827–1832. doi: 10.1007/s00264-010-1155-9

51. Yang M, Li C, Li Y, et al. Application of 3D rapid prototyping technology in posterior corrective surgery for Lenke 1 adolescent idiopathic scoliosis patients. *Medicine*. 2015;94(8):e582. doi: 10.1097/md.0000000000000582

52. Кулешов А.А., Ветрилл М.С., Шкарубо А.Н., и др. Аддитивные технологии в хирургии деформаций позвоночника // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2018. № 3-4. С. 19–29. [Kuleshov AA, Vetrille MS, Shkarubo AN, et al. Additive technologies in spinal deformity surgery. *Bulletin of Traumatology and Orthopedics named after N.N. Priorov*. 2018;(3-4):19–29. (In Russ).]

53. Бурцев А.В., Павлова О.М., Рябык С.О., Губин А.В. Компьютерное 3D-моделирование с изготовлением индивидуальных лекал для навигирования введения винтов в шейном отделе позвоночника // *Хирургия позвоночника*. 2018. Т. 15, № 2. С. 33–38. [Burtsev AV, Pavlova OM, Ryabikh SO, Gubin AV. Computer 3D-modeling with the production of individual patterns for navigating the introduction of screws in the cervical spine. *Spine Surgery*. 2018;15(2):33–38. (In Russ).]

54. Pan Y, Lü GH, Kuang L, Wang B. Accuracy of thoracic pedicle screw placement in adolescent patients with severe spinal deformities: a retrospective study comparing drill guide template with freehand technique. *Eur Spine J*. 2018;27(2):319–326. doi: 10.1007/s00586-017-5410-2

55. Коваленко Р.А., Черebilло В.Ю., Кашин В.А., и др. Определение оптимального дизайна навигационных матриц при транспедикулярной имплантации в шейном и верхнегрудном отделах позвоночника / 3D-технологии в медицине: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Нижний Новгород, 2019. С. 18–19. [Kovalenko RA, Cherebillo VYu, Kashin VA, et al. Determining the optimal design of navigation matrices for transpedicular implantation in the cervical and upper thoracic spine. 3D-technologies in medicine Materials of the IV All-Russian Scientific and practical conference. Nizhny Novgorod; 2019. P. 18–19. (In Russ).]

56. Коваленко Р.А., Пташников Д.А., Черebilло В.Ю., Кашин В.А. Сравнительный анализ результатов имплантации транспедикулярных винтов в грудном отделе позвоночника с использованием индивидуальных навигационных матриц и методики free hand // *Травматология и ортопедия России*. 2020. Т. 26, № 3. С. 49–60. [Kovalenko RA, Ptashnikov DA, Cherebillo VYu, Kashin VA. Comparative analysis of the results of implantation of transpedicular screws in the thoracic spine using individual navigation matrices and free hand techniques. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2020;26(3):49–60. (In Russ).]

57. Денисов А.А., Пташников Д.А., Михайлов Д.А., и др. Рентгенологическая оценка коррекции сегментарного и общего поясничного лордоза при применении индивидуальных лордозизирующих межтеловых имплантатов у пациентов с дегенеративным сколиозом // *Травматология и ортопедия России*. 2020. Т. 26, № 2. С. 71–78. [Denisov AA, Ptashnikov DA, Mikhailov DA, et al. Radiological assessment of segmental and general lumbar lordosis correction in the use of individual lordosing interbody implants in patients with degenerative scoliosis. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2020;26(2):71–78. (In Russ).]

58. Горбатов Р.О., Клеменова И.А., Новиков А.В., и др. Ревизионное эндопротезирование крупных суставов с использованием индивидуальных гибридных эндопротезов // *Современные проблемы науки и образования*. 2019. № 4. С. 50. [Gorbatov RO, Klimenova IA, Novikov AV, et al. Revision endoprosthesis replacement of large joints, using a hybrid mesh. *Modern problems of science and education*. 2019;(4): 50. (In Russ).]

59. Ширшин А.В., Кушнарев С.В., Макаров Д.А. Опыт применения аддитивных технологий в военно-медицинской академии имени С.М. Кирова. В сб. статей II Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению». Анапа, 2020. С. 66–71. [Shirshin AV, Kushnarev SV, Makarov DA. Experience in the application of additive technologies in the Military Medical Academy named after S.M. Kirov. The collection of: The State and prospects of development of modern science in the direction of «Biotechnical systems and technology». Collection of articles of the II all-Russian scientific-technical conference. Anapa; 2020. P. 66–71. (In Russ).]

60. Бывальцев В.А., Калинин А.А., Белых Е.Г., Степанов И.А. Симуляционные технологии в спинальной хирургии // *Вестник Российской академии медицинских наук*. 2016. Т. 71, № 4. С. 297–303. [Byvaltsev VA, Kalinkin AA, Belykh EG, Stepanov IA. Simulation technologies in spinal surgery. *Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2016;71(4):297–303. (In Russ).]

61. Бывальцев В.А., Белых Е.Г., Коновалов Н.А. Новые симуляционные технологии в нейрохирургии // *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко*. 2016. Т. 80, № 2. С. 102–107. [Byvaltsev VA, Belykh EG, Kononov NA. New simulation technologies in neurosurgery. *Questions of neurosurgery named after N.N. Burdenko*. 2016;80(2):102–107. (In Russ).]

62. Яковенко И.В., Кондаков Е.Н., Закондырин Д.Е. Симуляционные технологии в нейрохирургическом обучении // *Нейрохирургия*. 2015. № 1. С. 97–100. [Yakovenko IV, Kondakov EN, Zakondyryn DE. Simulation technologies in neurosurgical training. *Neurosurgery*. 2015;(1):97–100. (In Russ).]

63. Закондырин Д.Е., Кондаков Е.Н., Петришин В.Л., Пирская Т.Н. Симуляционное обучение навыкам оперативных вмешательств на позвоночнике // *Хирургия позвоночника*. 2015. Т. 12, № 2. С. 67–70. [Zakondyryn DE, Kondakov EN, Petrishin VL, Pirskaia TN. Simulation training in the skills of surgical interventions on the spine. *Spine Surgery*. 2015;12(2):67–70. (In Russ).]

64. Park HJ, Wang C, Choi KH, Kim HN. Use of a life-size three-dimensional-printed spine model for pedicle screw instrument training. *J Orthop Surg Res*. 2018;13(1):86. doi: 10.1186/s13018-018-0788-z

65. Мишинов С.В., Ступак В.В., Копорушко Н.А., и др. Трехмерное моделирование и печать в нейрохирургии / VIII Всероссийский съезд нейрохирургов: материалы съезда. Санкт-Петербург, 2018. С. 169. [Ishinov SV, Stupak VV, Koporushko NA, et al. Three-dimensional modeling and printing in neurosurgery. In the VIII All-Russian Congress of Neurosurgeons Materials of the Congress. Saint Petersburg; 2018. С. 169. (In Russ).]

66. Крылов В.В., Левченко О.В., Закондырин Д.Е. Практическая подготовка нейрохирургов в России. Часть 2. Опыт и перспективы // *Нейрохирургия*. 2017. № 2. С. 66–71. [Krylov VV, Levchenko OV, Zakondyryn DE. Practical training of neurosurgeons in Russia. Part 2. Experience and prospects. *Neurosurgery*. 2017;(2): 66–71. (In Russ).]

67. Мишинов С.В., Ступак В.В., Мамонова Н.В., и др. Методы трехмерного прототипирования и печати в реконструктивной нейрохирургии // *Медицинская техника*. 2017. № 2. С. 22–26. [Mishinov SV, Stupak VV, Mamonova NV, et al. Methods of three-dimensional prototyping and printing in reconstructive neurosurgery. *Medical equipment*. 2017;(2):22–26. (In Russ).]

68. Нагибович О.А., Свистов Д.В., Пелешок С.А., и др. Применение технологии 3D-печати в медицине // *Клиническая патофизиология*. 2017. Т. 23, № 3. С. 14–22. [Nagibovich OA, Svislov DV, Peleshok SA, et al. Application of 3D printing technology in medicine. *Clinical pathophysiology*. 2017;23(3):14–22. (In Russ).]

69. Алехнович А.В., Фокин Ю.Н., Есипов А.А. Состояние и перспективы развития аддитивных технологий в военных лечебно-профилактических учреждениях // *Госпитальная медицина: наука и практика*. 2019. Т. 1, № 2. С. 62–64. [Alekhovich AV, Fokin YuN, Esipov AA. The state and prospects of the development of additive technologies in military medical and preventive institutions. *Hospital medicine: science and practice*. 2019;1(2):62–64. (In Russ).]

70. Zheng W, Chen C, Zhang C, et al. The feasibility of 3D printing technology on the treatment of pilon fracture and its effect on doctor-patient communication. *Biomed Res Int*. 2018;2018:8054698. doi: 10.1155/2018/8054698

ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за переписку:

Яриков Антон Викторович, к.м.н.;
адрес: Российская Федерация, 603001, Нижний Новгород, наб. Нижне-Волжская, д. 2;
e-mail: anton-yarikov@mail.ru; eLibrary SPIN: 8151-2292;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4437-4480>

Соавторы:

Горбатов Роман Олегович, к.м.н.;
e-mail: gorbатов.ro@yandex.ru; eLibrary SPIN: 4328-2363;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6920-0770>

Денисов Антон Андреевич;
e-mail: denisov1993@gmail.com; eLibrary SPIN: 7505-7491;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9178-8715>

Смирнов Игорь Игоревич;
e-mail: igorev_19931993@mail.ru; eLibrary SPIN: 6390-0872;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1766-9515>

Фраерман Александр Петрович, д.м.н., профессор,
заслуженный деятель науки РФ;
e-mail: operacii39@mail.ru; eLibrary SPIN: 2974-3349;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3486-6124>

Соснин Андрей Геннадьевич, к.м.н.;
e-mail: sosdoc@yandex.ru; eLibrary SPIN: 6493-2303;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4437-0581>

Перльмуттер Ольга Александровна, д.м.н.
профессор; e-mail: oaperlmutter@mail.ru; eLibrary SPIN:
1243-9601; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7934-1437>

Калинкин Александр Александрович, к.м.н.,
e-mail: aleksandr_kalinkin27@mail.ru;
eLibrary SPIN: 9919-5834;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0720-4850>

71. Liew Y, Beveridge E, Demetriades AK, Hughes MA. 3D printing of patient-specific anatomy: a tool to improve patient consent and enhance imaging interpretation by trainees. *Br J Neurosurg*. 2015;29(5):712–714. doi: 10.3109/02688697.2015.1026799

AUTHORS INFO

Anton V. Yarikov, Cand. Sci. (Med.);
address: 2, nab. Nizhnevolzhskaya, 603001,
Nizhny Novgorod, Russia; e-mail: anton-yarikov@mail.ru;
eLibrary SPIN: 8151-2292; ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-4437-4480>

Roman O. Gorbатов, Cand. Sci. (Med.);
e-mail: gorbатов.ro@yandex.ru; eLibrary SPIN: 4328-2363;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6920-0770>

Anton A. Denisov, MD;
e-mail: denisov1993@gmail.com; eLibrary SPIN: 7505-7491;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9178-8715>

Igor I. Smirnov, MD;
e-mail: igorev_19931993@mail.ru; eLibrary SPIN: 6390-0872;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1766-9515>

Alexandr P. Fraerman, Dr. Sci. (Med.), Professor;
e-mail: operacii39@mail.ru;
eLibrary SPIN: 2974-3349;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3486-6124>

Andrey G. Sosnin, Cand. Sci. (Med.);
e-mail: sosdoc@yandex.ru; eLibrary SPIN: 6493-2303;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4437-0581>

Olga A. Perlmutter, Dr. Sci. (Med.), Professor;
e-mail: oaperlmutter@mail.ru; eLibrary SPIN: 1243-9601;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7934-1437>

Alexandr A. Kalinkin, Cand. Sci. (Med.);
e-mail: aleksandr_kalinkin27@mail.ru;
eLibrary SPIN: 9919-5834;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0720-4850>